

Christian Winkler

Entwicklung einer Verspannvorrichtung für eine  
adaptive Verspannung von SOFC-Stacks

BACHELORARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maschinenbau/Feinwerktechnik

Mittweida, 2009

Christian Winkler

Entwicklung einer Verspannvorrichtung für eine  
adaptive Verspannung von SOFC-Stacks

eingereicht als

BACHELORARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maschinenbau/Feinwerktechnik

Dresden, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reglich  
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Oliver Posdziech

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

## Bibliographische Beschreibung:

Winkler, Christian:

Entwicklung einer Spannvorrichtung für eine adaptive Verspannung von SOFC-Stacks. - 2009, - 72 S., Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik, Bachelorarbeit, 2009

## Referat:

Das Ziel der Bachelorarbeit ist, eine Spannungseinrichtung zu konstruieren und in einen Brennstoffzellenteststand zu integrieren. Anhand von wirtschaftlichen, konstruktiven und technologischen Kriterien soll eine geeignete Spannungsmethode ausgewählt werden. Die zu realisierende Spannungsanlage wird genutzt, um eine Hochtemperaturbrennstoffzelle der Art SOFC, die sich in einem Ofen (Hotbox) befindet, zu pressen. Die erforderliche Funktionsfähigkeit der Spanneinrichtung muss hergestellt und geprüft werden.

## Inhaltsverzeichnis

Abschnitt	Überschrift	Seite
1.	Einleitung	1
2.	Brennstoffzellen	4
2.1	Geschichte der Brennstoffzelle	4
2.2	Funktionsprinzip	5
2.3	Rahmenbedingungen	7
2.4	Brennstoffzelle als System	9
2.5	Brennstoffzellenarten	10
3.	Problemstellung	13
4.	Konzeption	17
4.1	Allgemeiner Lösungsansatz	17
4.2	Variante 1: Mechanische Verspannung	18
4.3	Variante 2: Hydraulische Verspannung	21
4.4	Variante 3: Pneumatische Verspannung	24
4.5	Variantenauswahl	27
5.	Entwurf der Verspannvorrichtung	30
5.1	Auswahl und Anordnung der Komponenten	31
5.2	Berechnungsnachweise	35
5.3	Schaltplan und Steuerung	40
5.4	Kostenschätzung	41
6.	Funktionstest	43
6.1	Test der manuellen Steuerseite	43
6.2	Test der automatischen Steuerseite	45
6.3	Gesamtheitlicher Funktionstest	48
7.	Zusammenfassung	52
8.	Glossar	54
9.	Anlagen	60
9.1	Literaturverzeichnis	60
9.1.1	Bücher	60

## II

9.1.2	Firmenschriften, Forschungsberichte, Verwaltungsdokumente	60
9.1.3	Abbildungsquellen	61

## Abbildungsverzeichnis

Abbildungsnummer	Seite
Abbildung 1: Zeigt die klassische Versuchsanordnung mit der die Funktion der Brennstoffzelle bewiesen wurde	5
Abbildung 2: Die Familie der galvanischen Elemente	5
Abbildung 3: Die Brennstoffzelle ist Energiewandler	6
Abbildung 4: Grundlegender Aufbau einer Brennstoffzelle mit Anode, Kathode, Elektrolyt und oft einem Katalysator	7
Abbildung 5: Brennstoffzellen können in Reihe oder Parallel geschaltet sein	8
Abbildung 6: Struktur einer planaren Brennstoffzelle mit Bipolar-beziehungsweise Interkonnektorplatten	9
Abbildung 7: Struktur eines Brennstoffzellensystems	10
Abbildung 8: Darstellung einer planaren Brennstoffzelle	12
Abbildung 9: Ein Stack mit montierten Endplatten und eine Verschraubung mit Zugankern	14
Abbildung 10: Hotbox in der ein SOFC-Brennstoffzellenstack eingebaut werden kann	16
Abbildung 11: Installation einer Verspanneinrichtung außerhalb der Hotbox	18
Abbildung 12: Grundlegende Struktur eines mechanischen Systems	18
Abbildung 13: Prinzipielle Struktur einer hydraulischen Anlage	21
Abbildung 14: Prinzipielle Struktur einer pneumatischen Anlage	24
Abbildung 15: Zeigt den Entwurf der pneumatischen Verspannungseinrichtung	31
Abbildung 16: Zeigt die Entwurfsanordnung der pneumatischen Komponenten auf der Montageplatte	35
Abbildung 17: Zeigt die gesamten Unterlagen des Brennstoffzellenstacks (Stack ist nicht dargestellt)	36
Abbildung 18 und 19: Die Platte 2 wird mit der ihrer vorhandenen Vergleichsspannung (von Mises) dargestellt. Die Verformungen sind zur Verdeutlichung überspitzt angezeigt.	38

Abbildung 20: Darstellung der Platte 5 mit einem Sicherheitsfaktor von 1490. Die rot gekennzeichneten Zonen besitzen eine Mindestsicherheit von 1307, doch bei 1490 ist eine plastische Verformung bis hin zum Bruch vorhanden.	38
Abbildung 21: Schaltplan des pneumatischen Verspannungssystems	41
Abbildung 22: Zeigt den Aufbau des Tests der manuellen Steuerseite	44
Abbildung 23: Stellt den realen Aufbau der Pneumatikkomponenten auf der Montageplatte dar	46
Abbildung 24: Zeigt die graphische Oberfläche der Steuersoftware	47
Abbildung 25: Das ist eine Darstellung des Versuchsstandes mit Pneumatikzylinder und Montageplatte mit Pneumatikkomponenten	48
Abbildung 26: Zeigt die Stempelkonstruktion, die Spezialwaage und die Ofenplatten im Versuchsstand	50

## Tabellenverzeichnis

Tabellennummer	Seite
Tabelle 1: Zeigt die Einstufung der Varianten in den verschiedenen Kategorien	27
Tabelle 2: Darstellung der Sicherheitsfaktoren der einzelnen Platten	37
Tabelle 3: Zeigt die Berechnungsgrundlage für die Knickbelastung an	40
Tabelle 4: Zeigt die eingestellten Parameter an der Anlage	49
Tabelle 5: Zeigt die Ergebnisse für die jeweiligen an der Computereinheit eingegebenen Sollwerte	50
Tabelle 6: Zeigt ähnlich wie Tabelle 5 die Ergebnisse für die jeweiligen an der Computereinheit eingegebenen Sollwerte nach der Anpassung der Schwerkraftkompensation	51



## Einheitsverzeichnis

Formelzei.	Einheit	Bedeutung
A	$\text{m}^2$	Flächeninhalt ist eine physikalische Zustandsgröße, die den Inhalt eines zweidimensionalen Körpers angibt
a	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung ist eine physikalische Größe, die die Änderung der Geschwindigkeit (v) eines Körpers angibt
E-Modul	$\text{N/m}^2$	Elastizitätsmodul ist ein Materialkennwert, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung beschreibt
F	N	Kraft ist eine physikalische Größe, die das Produkt aus Masse (m) und Beschleunigung (a) bildet
T	°C	Grad Celsius ist eine Maßeinheit der Temperatur
I	A	Die elektrische Stromstärke gibt an, wie viel Ladungen in einer Zeit (t) bewegt werden
I-Moment	$\text{m}^4$	Flächenmoment ist ein Querschnittskennwert, der im Rahmen der Festigkeitsberechnung von Bauteilen und Strukturen verwendet wird
Pi	$\Pi$	Kreiszahl ist eine mathematische Konstante und beträgt etwa 3,1415
p	bar	Druck ist eine physikalische Größe, die den Betrag einer Kraft (F) pro Fläche (A) darstellt
s	m	Weg ist eine physikalische Größe, sie gibt den Verlauf eines Ortes nach der Zeit (t) an
t	s	Zeit ist eine physikalische Größe, die das Fortschreiten der Gegenwart in die Zukunft beschreibt
U	V	Volt, SI-Einheit der elektrischen Spannung

v	m/s	Geschwindigkeit ist eine physikalische Zustandsgröße, die den Betrag einer Wegstrecke (s) und der Zeit (t) darstellt
---	-----	--

## 1. Einleitung

Während die Nachfrage nach Energie weltweit ansteigt, gehen die Vorräte an fossilen Brennstoffen als derzeit wichtigste Energiequelle zurück. Darüber hinaus entsteht beim Einsatz fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung Kohlenstoffdioxid, was eine der Hauptursachen für den Klimawandel ist. Die Welt braucht für eine nachhaltig hohe Lebensqualität eine logistisch sichere, zuverlässige und saubere Energieversorgung.

Die Brennstoffzelle ist eine Schlüsseltechnologie für die Zukunft der Menschheit. Brennstoffzellen können eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten erfüllen. Dieses Spektrum reicht vom tragbaren Telefon über Kraftfahrzeuge jeder Größe, Luftfahrzeuge und Schiffe bis hin zur Stromerzeugung im großen Maßstab. Brennstoffzellen setzen bei elektrochemischer Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrische Energie und Wasser als Dampf frei. Der Wirkungsgrad ist außerordentlich hoch und außerdem fallen bei der Verwendung von reinem Wasserstoff keine Schadstoffemissionen an.

Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern ein Energieträger und ist nicht als Naturstoff auf der Erde in Lagerstätten zu finden, wie zum Beispiel Erdöl. Nun stellt sich die Frage, wo soll der Wasserstoff herkommen? Die Erzeugung kann auf ganz unterschiedliche Weise aus verschiedenen Energiequellen erfolgen, das heißt, aus fossilen Brennstoffen ebenso wie aus erneuerbaren Energieformen oder auch aus Kernbrennstoffen. Die gebräuchlichste Methode zur Herstellung größerer Mengen ist derzeit die katalytische Umwandlung von Kohlenwasserstoff unter Einsatz von Dampf und Wärme. Während manche Herstellungsmethoden bereits etabliert sind, wie Reformierung (katalytische Umwandlung), sind für Andere noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Europa besitzt eine starke Ausgangsposition in Erforschung, Entwicklung und auch im Einsatz der erforderlichen Technologien, die für eine auf Wasserstoff gestützte Wirtschaft nötig sind. Trotzdem ist wegen der Größe der Herausforderung eine weltweite Zusammenarbeit in der Forschung und Entwicklung unerlässlich. Doch wie überall steckt der Teufel im Detail, dies erfordert ein höchstes Maß an Genauigkeit und umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Ein wichtiges Forschungs- und Entwicklungsunternehmen ist die EBZ GmbH in der sächsischen Landeshauptstadt Dresden. Die Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle besitzt ein breites Produktrepertoire in den Bereichen Prozesstechnologie und Teststände für Brennstoffzellen. Forschung und Entwicklung gehören zu den zentralen Aufgaben der EBZ GmbH, um modernste Brennstoffzellenversuchsstände auf dem Weltmarkt anbieten zu können.

Das Zusammenwirken zwischen der Brennstoffzelle und dem Versuchsstand muss harmonisch und effektiv funktionieren. Eine Reihe von Komponenten ist erforderlich, um ein Brennstoffzellensystem zu realisieren. Im groben gliedern sich die Komponenten in Eingabemedien, Eingabemedienaufbereitung, Brennstoffzelle (auch Stack genannt), Kühlung, Abgabemedienaufbereitung und Abgabemedien. Ein gesamtes System ist wie eine Kette, sie ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied, beziehungsweise Komponente. Das heißt, es ist bei der Forschung mit Bedacht auf die Gesamtheit des Systems zu achten. Das Umfeld muss optimal gestaltet werden, damit maximale Ergebnisse erzielt werden können. Denn was nützt es, wenn man einen sehr gut funktionierenden Versuchsstand besitzt, aber nur eine zweitklassige Brennstoffzelle? Jede Optimierung oder Verbesserung in diesem Bereich ist ein Schritt in die Zukunft und kann zur Sicherung folgender Generationen führen. Details können manchmal große Lösungen offerieren. Im Fokus steht die Verbesserung des Brennstoffzellensystems.

Hohes Verbesserungspotenzial ist zum Beispiel in der Art der Verspannung einer Brennstoffzelle vorhanden. Denn ungleichmäßige oder unkontrollierte

Ausdehnungen sind ein wesentlicher Faktor zur Beeinflussung von Lebensdauer und Effektivität einer Brennstoffzelle. Das größte Dilemma der Brennstoffzelle ist die Lebensdauer, sie ist noch nicht hoch genug, um den endgültigen Durchbruch zu schaffen. Die hohe Alterung (auch Degradation genannt) hängt stark mit der Dichtigkeit, also der Art der Verspannung, zusammen. Diese Projektarbeit handelt von den Komponenten und der Realisierung einer sinnvollen Verspannungsmethode einer Brennstoffzelle. Das heißt, eine effektive Verspannungsvariante zu entwickeln, die eine Möglichkeit bietet, einen Schritt nach vorn zu machen.

## **2. Brennstoffzellen**

### **2.1 Geschichte der Brennstoffzelle**

Die Idee der Brennstoffzelle ist über 150 Jahre alt. Es ist aus heutiger Sicht schwer zu ermitteln, wer der Erfinder war, aber manchmal kommt es vor, dass Technologien chronometrisch parallel entwickelt werden. Dies scheint wohl der Fall zu sein, sowohl der Schweizer Christian Friedrich Schönbein als auch der Brite William Robert Grove sind Erfinder der Brennstoffzelle. Christian Friedrich Schönbein führte im Jahr 1838 ein chemisches Experiment durch, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff eine elektrische Energie frei setzten. Sir William Robert Grove war der, der in dieser Zeit die erste funktionierende Brennstoffzelle baute. Aufgrund der Erfindung der Dynamomaschine von Werner von Siemens konnte sich die „Galvanische Gasbatterie“, (wie die Brennstoffzelle damals bezeichnet wurde), nicht durchsetzen und geriet schnell in Vergessenheit.

Anfang der 60iger Jahre suchte die NASA nach einer Stromquelle für Raumfahrtprojekte. Die Brennstoffzelle konnte passende Eigenschaften für diese Anwendung offerieren, wie einem geringen Gewicht und dem bei Reaktion entstehenden Abfallprodukt Wasser, dieses wird bei bemannten Raumkapseln zwingend benötigt. Aufgrund der Öko- und Energieproblematik, die in den letzten 20 Jahren immer näher in den Fokus gerückt ist, hat die Brennstoffzellentechnologie enormes entwicklerisches Interesse geweckt. Mittlerweile arbeiten unzählige Unternehmen an der Entwicklung und Markteinführung der Brennstoffzelle. Die starken Aktivitäten im Bereich Brennstoffzelle zeigen schon, dass ein gewaltiges Potenzial vorhanden ist und ein revolutionärer Durchbruch bevorsteht.

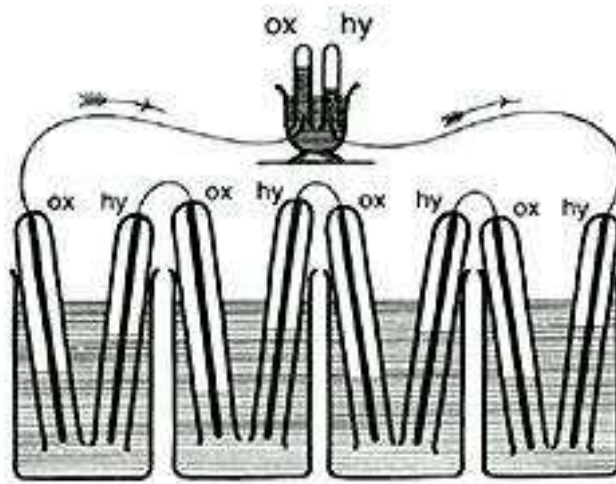


Abbildung 1: Zeigt die klassische Versuchsanordnung mit der die Funktion der Brennstoffzelle bewiesen wurde

## 2.2 Funktionsprinzip

Was ist eine Brennstoffzelle? Eine Brennstoffzelle ist ein galvanisches Element, das chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und Oxidationsmittels in elektrische Energie umwandelt. Ein galvanisches Element funktioniert nach dem Prinzip einer Redoxreaktion, bei dieser chemischen Reaktion werden Elektronen übertragen, das bedeutet, Elektronenabgabe (Oxidation) und Elektronenaufnahme (Reduktion). Zu den galvanischen Elementen gehören Primärzellen (Batterien), Sekundärzellen (Akkumulatoren) und Brennstoffzellen.

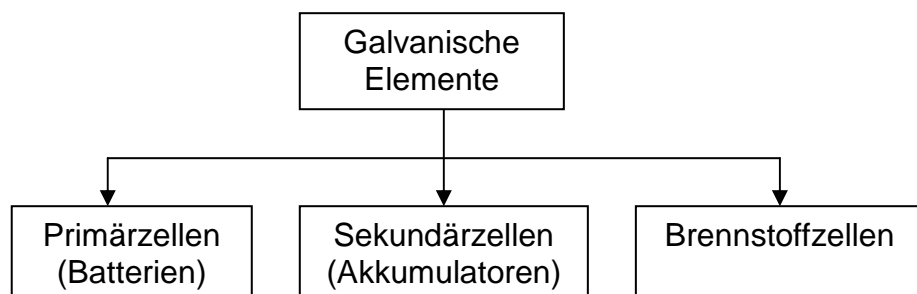


Abbildung 2: Die Familie der galvanischen Elemente

Es ist wesentlich, dass Brennstoffzellen Energiewandler sind und keine Energiequellen. Ein Energiewandler hat die Aufgabe, die vorhandene Energieform (zum Beispiel kinetische, thermische, chemische, etc.) in eine andere zu transformieren.

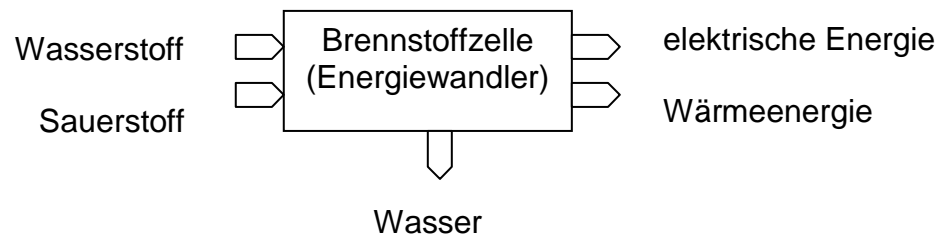


Abbildung 3: Die Brennstoffzelle ist Energiewandler

Als Energiequellen gelten fossile Brennstoffe (zum Beispiel Kohle, Erdöl, etc.), Kernbrennstoffe (zum Beispiel Uran) und regenerative Energiequellen, wie Sonnen-, Wind- und Wasserenergie. Bei der Brennstoffzelle ist es möglich, verschiedene Brennstoffe als Energiequelle zu nutzen, wie beispielsweise Methanol, Benzin, Erdgas. Die potentiellen Brennstoffe müssen wasserstoffhaltig sein, dieser muss in einem Reformierungsvorgang separiert werden.

Zur Energieumsetzung in der Brennstoffzelle müssen beide Reaktanten, also Wasserstoff (Energieträger) und Sauerstoff (Oxidator), zur Reaktion kommen. Diese so genannte „kalte“ Verbrennung kann auch bei hohen Temperaturen stattfinden. Bei den Hochtemperatur-Brennstoffzellen wie zum Beispiel SOFC-Brennstoffzellen können Betriebstemperaturen von 650...1000 °C herrschen. Bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen können teilweise Temperaturen von 100 °C erreicht werden.



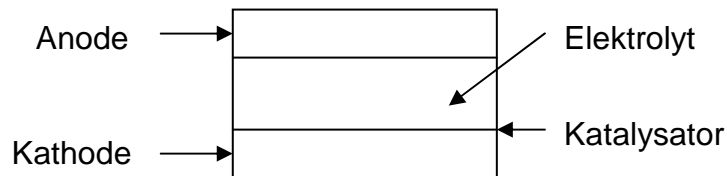


Abbildung 4: Grundlegender Aufbau einer Brennstoffzelle mit Anode, Kathode, Elektrolyt und oft einem Katalysator

Eine Brennstoffzelle besteht aus Anode und Kathode, die durch einen Elektrolyt oder durch eine Membran voneinander gesondert sind und (meistens) einen Katalysator besitzen. Die Elektroden (Kathode und Anode) sind Elemente, an denen sich die Energietransformierung ereignet. Voraussetzungen für eine günstige Reaktion ist eine poröse Oberfläche für eine große Reaktionsfläche, um diese Oberflächen zu realisieren, werden oft Kohle- oder Metallpulver verwendet. Diese Fläche wird auch zur Unterbringung von Katalysatoren, Metalle wie Platin, Rhodium und Ruthenium genutzt. Der Katalysator soll möglichst die Reaktionsgeschwindigkeit beschleunigen, beziehungsweise den Ablauf intensivieren. Je intensiver dieser chemische Reaktionsprozess ist, desto mehr Energie kann freigesetzt werden. Die chemische Reaktion verläuft so, dass der molekulare Wasserstoff in die Poren der Anode eintritt und an der Dreiphasenregion „Gas-Elektrode-Elektrolyt“ ankommt. Hier findet die Transformierung der gespeicherten Energie aus dem Brennstoff in elektrische Energie und Wärmeenergie statt.

### 2.3 Rahmenbedingungen

Die elektrische Energie ist bestimmt durch Stromstärke und elektrische Spannung, auch Zellspannung genannt. Die theoretische Spannung, die mit dem Brennstoff Wasserstoff erreicht werden kann, beträgt 1,44V. Um die geeignete Spannung zu erzielen, werden mehrere Zellen seriell zu einem Stack geschaltet. Als Stack bezeichnet man das in Reihe schalten von planaren Brennstoffzellen. Um eine hohe Stromstärke zu gewinnen, werden mehrere Zellen oder Stacks parallel geschaltet. So ist es möglich, je nach Anforderung,

eine passende Kombination aus Reihen- und Parallelschaltungen vor zu nehmen.

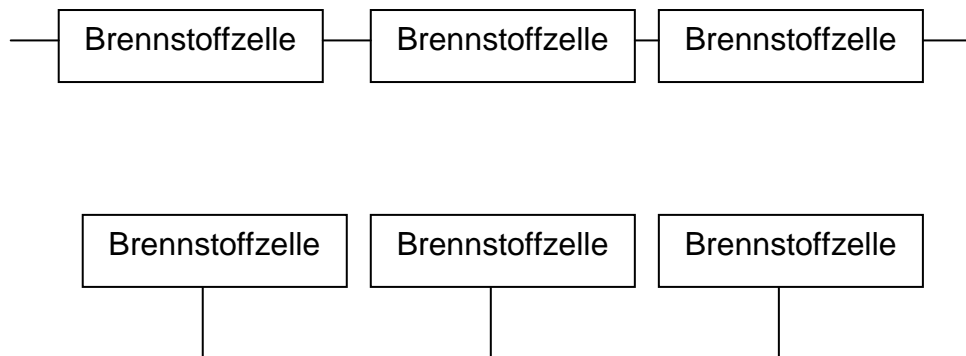


Abbildung 5: Brennstoffzellen können in Reihe oder Parallel geschaltet sein

Addiert man alle verhältnismäßig geringen Verluste, wie ohmsche Verluste, thermodynamische Verluste oder Verluste durch den Elektrolyt, so ergibt sich doch ein Verlustwert, der den Wirkungsgrad relevant verringert. Trotz dessen können hohe Wirkungsgrade ermöglicht werden, da Brennstoffzellen nicht dem Carnot-Gesetz unterliegen. Die Wirkungsgrade bei Verwendung der elektrischen Energie und der Wärmeenergie betragen 62-79% im Idealfall. Diese Wirkungsgrade sind im Wesentlichen abhängig von der Art der Brennstoffzelle und von zahlreichen Parametern. Brennstoffzellen offerieren außerdem einen geringen Ausstoß an Emissionen, mit der kein herkömmliches Energiewandlungsverfahren mithalten kann. Die Brennstoffzellen können weitere Vorteile anbieten, wie hohe Energiedichte, geräusch- und vibrationsfreier Betrieb, modularer Aufbau und Gewinnung von elektrischer Energie und Wärmeenergie.

Ein Stack sind Brennstoffzellen die in Reihe geschaltet wurden, diese Variante findet in der Praxis häufig Anwendung. Die Anzahl der Zellen bestimmt dabei die Ausgangsspannung und ihre Fläche die Stromstärke. Um die einzelnen Zellen voneinander zu trennen, eignen sich so genannte Bipolarbeziehungsweise Interkonnektorplatten. Solche Platten haben mehrere Aufgaben, sie stellen eine Verbindung zwischen der Kathode einer Zelle und der Anode der nächsten Zelle her. Außerdem gewähren sie die Versorgung mit

Brennstoffen. Um die Leitung des Brennstoffes und des Oxidators zu sichern, müssen entsprechende Kanäle eingelassen sein.

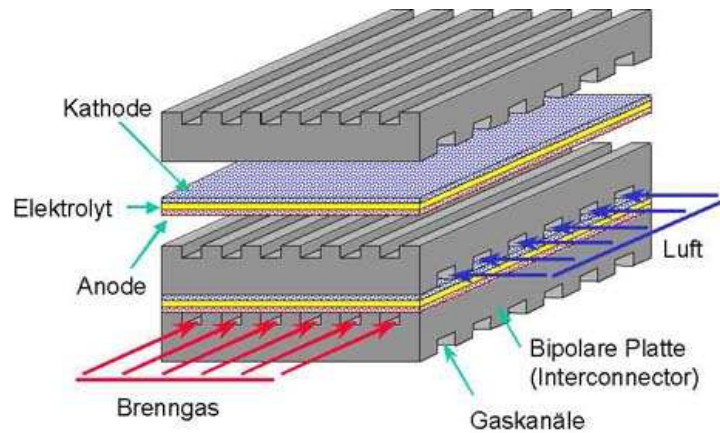


Abbildung 6: Struktur einer planaren Brennstoffzelle mit Biopolar-beziehungsweise Interkonnektorplatten

## 2.4 Brennstoffzelle als System

Damit der Stack seine Funktion erfüllen kann, ist er auf verschiedene Zusatzgeräte angewiesen. Zu den wesentlichen Aufgaben dieser Zusatzgeräte gehören Brennstoffaufbereitung, Oxidatoraufbereitung, Kühlung und Stromaufbereitung. In der Brennstoffaufbereitungseinheit wird in einem Reformer Wasserstoff für die Versorgung des Stacks umgewandelt. Die Oxidatoraufbereitungseinheit stellt Sauerstoff beziehungsweise Luftsauerstoff der Brennstoffzelle zur Verfügung, sie besteht aus Pumpen und Filtern. Die Kühlung des Systems wird durch die Kühlungseinheit realisiert, hier kommen Ventilatoren und Pumpen zum Einsatz. Die Stromaufbereitung ist insofern notwendig, damit die Ausgangsspannung, Stromstärke und die Stromart (Gleich- oder Wechselstrom) entsprechend angepasst werden kann.

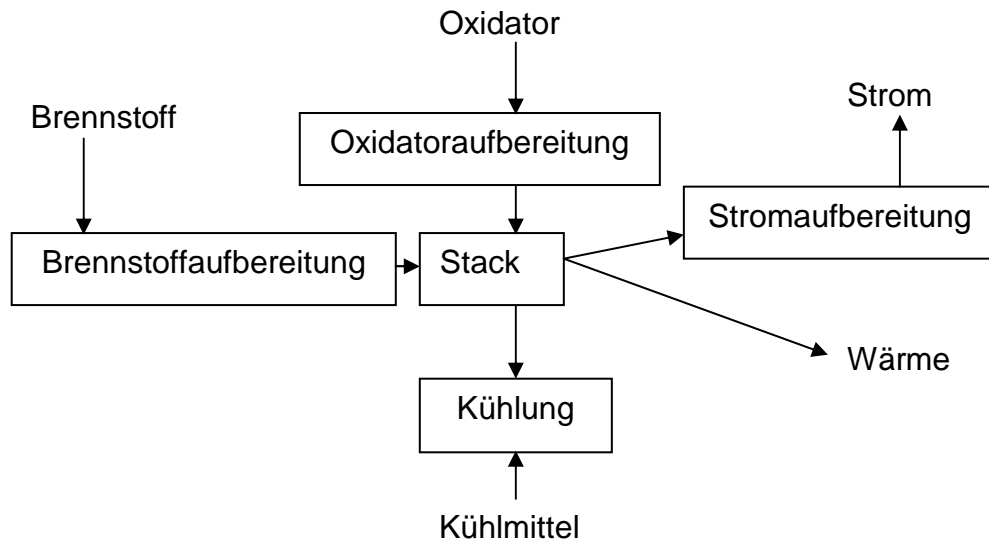


Abbildung 7: Struktur eines Brennstoffzellensystems

## 2.5 Brennstoffzellenarten

### AFC-Brennstoffzelle

Die AFC-Brennstoffzelle ist eine der ältesten Brennstoffzellenarten. Die Zelle besteht aus einer Anode, einer Kathode und einem Elektrolyten. Bei dieser Brennstoffzellenart besteht der Elektrolyt aus Kalilauge. Die Betriebstemperatur dieses Zellentyps liegt zwischen 60...120 °C. Diese Zelle ist sehr robust und besitzt ein gutes dynamisches Verhalten, aber sie ist sehr empfindlich gegenüber Verschmutzungen.

### PEMFC-Brennstoffzelle

Die PEMFC-Brennstoffzelle ist eine der bekanntesten Brennstoffzellentypen. Der Aufbau ist wie bei den anderen Sorten gleich, eine Anode, eine Kathode und einem Elektrolyten. Der Elektrolyt ist bei diesem Zellentyp eine protonenleitende Membran. Die Betriebstemperatur liegt bei der PEMFC-Zelle zwischen 80...90 °C. Die PEMFC-Brennstoffzelle weist eine hohe Stromdichte auf, der Elektrolyt ist kohlenstoffdioxidbeständig, nachteilig sind die

Empfindlichkeiten gegen Verschmutzungen und der niedrige Anlagenwirkungsgrad.

#### DMFC-Brennstoffzelle

Die DMFC-Brennstoffzelle nutzt den Brennstoff Methanol als Energiequelle zur Gewinnung von elektrischer Energie und Wärmeenergie. Dieser Typ der Brennstoffzelle arbeitet nicht wie alle anderen Arten mit Wasserstoff, sondern der Anode wird Methanol und Wasser zugeführt. Die DMFC-Zelle stellt eine Version der PEMFC-Zelle dar. Der Unterschied besteht nur im eingesetzten Brennstoff. Die Betriebstemperatur liegt zwischen 90...120 °C.

#### PAFC-Brennstoffzelle

Die PAFC-Brennstoffzelle folgt dem gleichen Funktionsprinzip wie die PEMFC-Brennstoffzelle. Der einzige Unterschied liegt in dem gewählten Elektrolyt, bei der PAFC-Zelle wird eine hochkonzentrierte Phosphorsäure verwendet. Diese Zellenart arbeitet im Temperaturbereich von 135...200 °C. Vorteile der PAFC-Zelle sind hohe Robustheit und erhöhte Toleranz gegen Verschmutzungen des Brenngases, ungünstig ist eine geringe Leistungsdichte und ein niedriger Anlagenwirkungsgrad.

#### MCFC-Brennstoffzelle

Die MCFC-Brennstoffzelle muss, im Gegensatz zu anderen Brennstoffzellentypen, mit zusätzlichem Kohlendioxid beliefert werden. Außerdem können als Brennstoffe Kohlenmonoxid und Wasserstoff oder eine Mischung aus beiden verwendet werden. Die Betriebstemperatur bei dieser Brennstoffzellenart beträgt etwa 650 °C.

#### SOFC-Brennstoffzelle

Die SOFC-Brennstoffzelle ist ein sehr wichtiger Typ, da sie das Herzstück des EBZ-Brennstoffzellensystems ist. SOFC-Zellen (englisch Solid Oxide Fuel Cell)

sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die bei Temperaturen zwischen 650...1000 °C arbeiten. Dieser Zellentyp kann Wasserstoff oder Kohlenmonoxid als Brennstoff verwenden. Man kann diesen Zellentyp in zwei Bauarten unterteilen: tubulare (röhrenförmige) und planare (plattenförmige). Die SOFC-Technologie zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus.

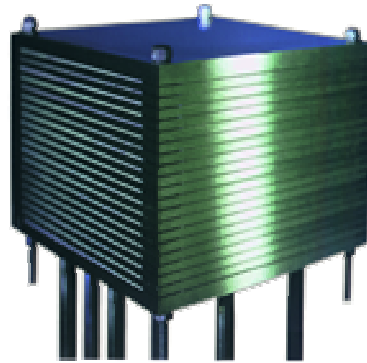


Abbildung 8: Darstellung einer planaren Brennstoffzelle

### 3. **Problemstellung**

Zum Produktprogramm der EBZ gehören Test- und Demonstrationssysteme für Hochtemperaturbrennstoffzellen vom Typ der SOFC. Die Funktion eines SOFC-Stacks, sowohl in Systemen als auch in Versuchsständen, erfordert eine adaptive mechanische Verspannung. Die Verspannung muss linear mit hoher Genauigkeit verstell- und nachführbar sein. Als Varianten kommen mechanische, hydraulische oder pneumatische Systeme in Frage.

Das Ziel der Arbeit ist ein Vergleich des apparativen Aufwands, der Automatisierbarkeit, der Kosten und der Regelgenauigkeit von verschiedenen Varianten der Einstellung der Verspannkraft. Die Untersuchungen sind sowohl theoretisch als auch experimentell anhand eines Versuchsaufbaus durchzuführen. Für die theoretischen Untersuchungen soll ein neu bei der EBZ zu integrierendes System für FEM zum Einsatz kommen. Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen ist die viel versprechende Variante auszuwählen. Die Lösungsansätze sind dabei entsprechend zu dokumentieren. Im praktischen Teil der Arbeit ist eine Versuchsanlage zu konstruieren und aufzubauen, um eine Stackverspannung möglichst realitätsnah nachbilden zu können. Darin ist eine Kraftmesseinrichtung zu integrieren. Die erzielten Versuchsergebnisse sind mit den theoretischen Annahmen zu vergleichen und zu dokumentieren.

Die meisten vorhandenen Verspannungsarten sind unzureichend oder können die Anforderungen nur teilweise erfüllen. Es gibt verschiedene Verspannungsvarianten für SOFC-Stacks, die Stack arbeiten meistens bei einer Temperatur von etwa 850 °C. Die häufigste Stackverspannung ist eine Fixierung durch zwei Endplatten. Die Endplatten werden an der Ober- und Unterseite (Kopf- und Fußplatten) installiert und meistens mit vier Zugankern beziehungsweise Zugstangen verbunden und auch entsprechend verschraubt. Es gibt Endplattenverspannungen in unterschiedlichen Bauformen, um auf differente Anforderungen zu reagieren. Arten der Endplattenverspannung sind:

Kopfplattenbauform (sind profilierte Endplatten wie eine Art Sandwichbauweise), vorgekrümmte und elastische Endplattenbauform, Bauform der Übertragung mittels hydrostatischen Drucks (Flüssigkeitsbett in der Endplatte), Bauform der Krafteinleitung über Mitte und Rand (Endplattenaufbau ähnlich einem Doppel-T-Träger), Bauform der Kraftverteilung durch einen Schaumkern (schüsselförmige Endplatte mit geeignetem Schaumkern) und Bauform der Kombination aus zwei dünnen Endplatten.



Abbildung 9: Ein Stack mit montierten Endplatten und eine Verschraubung mit Zugankern

Warum ist es notwendig, eine innovative Verspannvorrichtung für SOFC-Stacks zu entwickeln? Die oben beschriebenen Verspannungslösungen können die gestellten Anforderungen nur unzureichend erfüllen. Zu diesen Aufgaben beziehungsweise Anforderungen gehören im Wesentlichen: die Dichtigkeit des Stacks zu gewährleisten, dem inneren Überdruck entgegenzuwirken und die elektrische Kontaktierung zwischen den Interkonnektorplatten zu sichern. Die Dichtheit beziehungsweise Dichtigkeit ist ein Kriterium für die Leistungsfähigkeit eines Stacks, jegliche Verluste verringern die Effizienz und die Lebensdauer der Zellen. Der innere Überdruck hängt stark mit der Dichtigkeit zusammen. Um eine hohe Dichtigkeit zu sichern, muss je nach Zustand, das heißt, aktuelle Temperatur und Wert des inneren Überdrucks, eine definierte Kraft aufgebracht



werden. Das bedeutet, dass eine Steuerung des Maßes der Kräfte vorgenommen werden muss, um definierte Kräfte zu gewährleisten. Vorhandene Verspannungskonzepte können durch die Verschraubung mit Zugankern nur eine bestimmte konstante Kraft aufbringen und nicht auf die jeweilige Situation reagieren. So kann es bei häufigen Temperaturänderungen schnell zu Undichtigkeiten kommen. Im Wesentlichen ist es auch notwendig, dass eine Verspannvorrichtung mit linear hoher Genauigkeit arbeitet und entsprechend verstell- und nachführbar ist. Dies ist nötig, um auf eine Ausdehnung zu reagieren und die definierte Kraft konstant halten zu können.

Die Grundlage der zu entwickelnden Verspannungslösung ist ein SOFC-Brennstoffzellensystem der Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH. In der EBZ GmbH werden SOFC-Stacks angewendet. Die Abmessungen eines SOFC-Stacks können stark variieren, dies hängt von der Art des Brennstoffzellensystems ab. In diesem Fall sind die Seitenlängen etwa 150 mm und die Höhe etwa 20 mm, die Höhe kann je nach Anzahl der Zellenebenen unterschiedlich sein. Insofern ist es wichtig, eine flexible Einstellhöhe vornehmen zu können, vorhandene Verspannungen können dies nicht offerieren. Der SOFC-Stack arbeitet mit einer Betriebstemperatur von circa 850 °C. Um diese Umgebungstemperatur zu realisieren, werden die Zellen in einer so genannten Hotbox (Ofen) integriert. Die größte Kraft, die der Arbeitszylinder aufbringen muss, beträgt 2500 N und ein definierter Schwankbereich ist einzuhalten. Außerdem sollte der gewählte Zylinder doppelt wirkend sein, oder, um eventuelle Kosten zu reduzieren, einfach wirkend (Zylinder drückend). Weitere Kriterien sind Einbauwinkel, Wiederholgenauigkeit und Regelbarkeit. Der Einbauwinkel beträgt  $-90^\circ$ , das heißt, die Kolbenstange fährt senkrecht nach unten in Richtung Boden. Eine hohe Wiederholgenauigkeit, wie zum Beispiel  $\pm 0,02$  mm, ist ein grundsätzliches Kriterium für Funktionalität und Handhabung. Eine stufenlose Regelbarkeit ist erforderlich, da eine schrittweise Regelung zu ungleichmäßigen Belastungen führen kann und möglicherweise Schäden verursacht werden. Eine Kraftmesseinrichtung beziehungsweise ein Drucksensor ist notwendig.

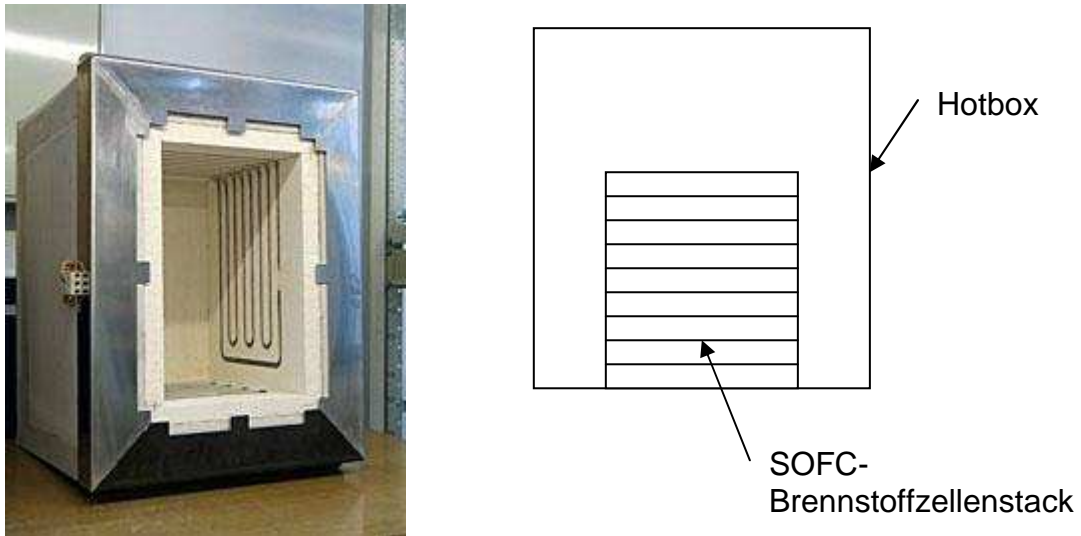


Abbildung 10: Hotbox in der ein SOFC-Brennstoffzellenstack eingebaut werden kann

Selbstverständlich entwickeln auch andere Unternehmen und Einrichtungen speziell im Bereich SOFC-Brennstoffzellen. Die Forschung und Entwicklung wird auf allen Ebenen des SOFC-Sektors vorangetrieben. Die Konkurrenz schläft nicht, denn schnelle Markteinführung sichert Wettbewerbsvorteile. Aktuell forscht die Staxera GmbH aus Dresden an einem ähnlichen Modell zur Verspannung von Brennstoffzellen und besitzt auch einen Prototyp. Auch die dänische Firma Topsoe Fuel Cell hat einen etwa vergleichbaren Prototyp entwickelt.

## 4. **Konzeption**

Um eine Lösung der Problemstellung zu entwickeln, werden Varianten entworfen. Diese werden analysiert und verglichen, um die viel versprechende Lösungsmöglichkeit zu finden. Die zu untersuchenden Varianten sind: eine mechanische Verspannung, eine hydraulische Verspannung und eine pneumatische Verspannung. Die Varianten werden hinsichtlich des apparativen Aufwandes, der Automatisierbarkeit, der Kosten und der Regelgenauigkeit untersucht.

### 4.1 **Allgemeiner Lösungsansatz**

Alle Lösungsansätze haben eine Gemeinsamkeit, diese ist aber keine Konstruktionsvoraussetzung, sondern mehr eine Richtlinie für diese Einrichtungen. Alle drei Varianten mechanische, hydraulische und pneumatische, ähneln sich in ihrer Funktionsweise. Die drei Optionen sollen, egal welche gewählt wird, außerhalb der Hotbox montiert werden. Genauer soll die gewählte Einrichtung direkt beziehungsweise auf der Hotbox fixiert werden. Es gibt natürlich auch Lösungsansätze, bei dem die entsprechenden Einrichtungen in der Hotbox selbst installiert werden, oder aber partielle Verteilung der Komponenten inner- und außerhalb der Box. Zum Beispiel, das Abtriebsselement und gezwungenermaßen die Aktorik (Arbeitselement) in die Box zu implementieren und den Antrieb sowie Steuer- und Regelung extern einzurichten. Aber solche oder gleichartige Fälle werden nicht betrachtet, da sie tief greifende Nachteile mit sich bringen, wie etwa Schutz der Komponenten in der Hotbox vor den vorherrschenden Temperaturen oder Einschränkungen der Flexibilität (Auf- und Umbau).

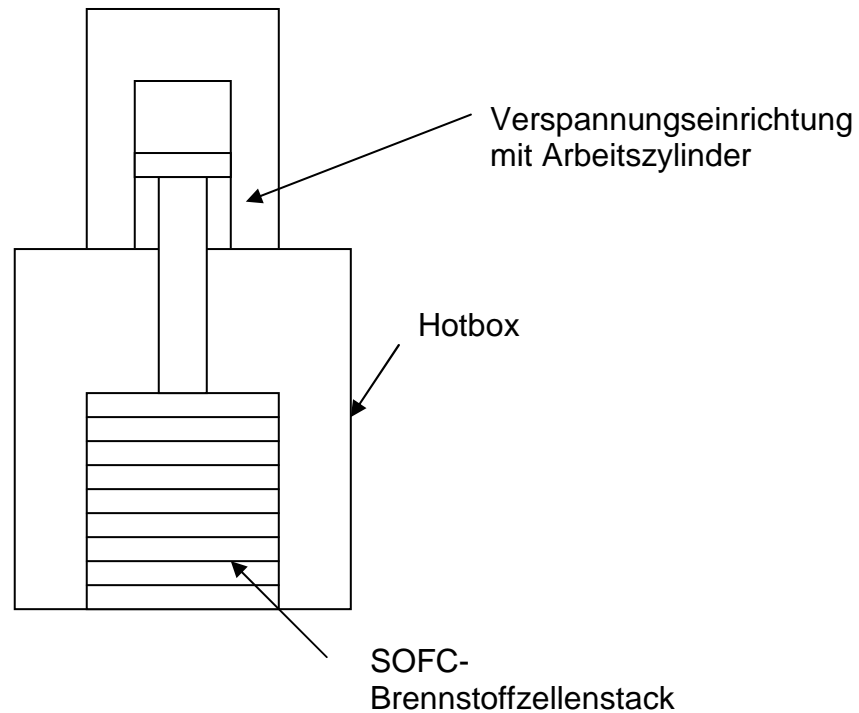


Abbildung 11: Installation einer Verspanneinrichtung außerhalb der Hotbox

#### 4.2 Variante 1: Mechanische Verspannung

Der apparative Aufwand bei dieser Variante gliedert sich grundsätzlich in Antrieb, Steuerung, Abtrieb und Aktorik (Arbeitselement). Bei der mechanischen Lösungsvariante wird der apparative Aufwand möglichst gering gehalten, da das Prinzip der Mechanik auch auf simplen Funktionen und Mechanismen beruht.

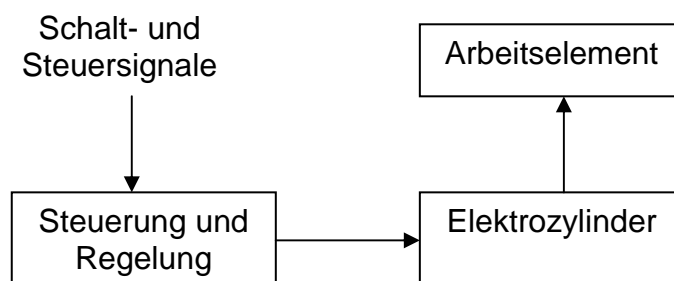


Abbildung 12: Grundlegende Struktur eines mechanischen Systems

Der Antrieb ist gegenüber den anderen Lösungsmethoden eine Besonderheit, denn hier gibt es keinen externen Elektro- oder Verbrennungsmotor, der eine mechanische Bewegung erzeugt. Im Elektrozylinder ist ein Elektromotor (Linearmotor) eingebaut und meistens auch ein Getriebe. Der eingesetzte Elektrozyylinder kann direkt elektrischen Strom in eine Kolbenbewegung transferieren, somit entfällt ein Wandlungsschritt im Vergleich zu den anderen Lösungsvarianten, wie Hydraulik oder Pneumatik. Damit ergibt sich beim apparativen Aufwand eine zufrieden stellende Ersparnis.

Die Regelung und Steuerung der mechanischen Einrichtung hat die Aufgabe, durch Taster, Steuer- und Regelvorgänge die Größen Kraft beziehungsweise Druck zu lenken. Steuereinheiten sind zum Beispiel eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), Schalter, Taster und selbstverständlich eine notwendige Stromversorgung. Die relevanten Schalt-, Steuer- und Regelinformationen können von außerhalb der Anlage aufgegeben werden.

Die Konstruktion vereint Antrieb und Abtrieb, die durch das Bauelement eines Elektrozylinders gekennzeichnet sind. Der Zylinder setzt elektrische Energie in mechanische Energie um, damit führt er mechanische Arbeit aus. Durch die Anwendung eines solchen Zylinders ist es außerdem nicht notwendig, ein Druckmedium einzusetzen, da er elektrische Energie direkt umwandelt in mechanische Energie.

Das Arbeitselement ist der SOFC-Stack, der durch die aufgebrachte Kraft stabilisiert und verspannt wird. Je nach Bedarf kann eine Vielzahl von Zubehörteilen hinzugefügt werden, wie zum Beispiel eine Kraftmesseinrichtung, die Stärkeverhältnisse wider gibt.

Eine Anlage mit Elektrozyylinder lässt sich sehr gut automatisieren. Da alle Elemente wie Elektromotor, Getriebe, Spindel, Endschalter sich in einem kompakten Bauteil befinden, kann die Anlage schnell und simpel aufgebaut werden. Diese Zylinderart kann mit einer hohen Lebensdauer und Robustheit überzeugen. Auch die Steuer- und Regelung gestalten sich einfach und

kompakt. Der sehr geringe apparative Aufwand begünstigt zusätzlich die Automatisierbarkeit, nämlich durch den wenigeren Aufwand an Bauelementen.

Dieses Anlagensystem ist recht simpel strukturiert, das heißt, es gibt nur wenige Parameter die Einfluss auf die Regelgenauigkeit haben. Folglich ergibt sich eine hohe Genauigkeit der Einrichtung und ein stabiler Bewegungscharakter mit schnellem Ansprechverhalten. Die Verfahrbewegung kann stufenlos eingestellt werden, so kann innerhalb der Hublänge jede Position angesteuert werden. Für die Drucküberwachung enthält das Zubehörprogramm einen Drehmomentbegrenzer.

Eine unkomplizierte Vorrichtung kann finanzielle Vorteile bieten. Dieses System kann neben der Reduzierung der Gesamtkosten auch eine deutliche Energieeinsparung ermöglichen, was ein zusätzlicher positiver Effekt ist. Der Kostenvorteil gegenüber anderen Varianten liegt im apparativen Aufwand, der hier mit einem Arbeitszylinder und einer Regelungs- und Steuereinheit sehr gering ausfällt. Im Stillstand beziehungsweise Ruhezustand benötigen Elektrozyylinder keine Energie, da sie oftmals über mechanische Selbsthemmung verfügen. Dadurch resultiert ein weiterer Kostenvorteil, der je nach Gebrauchshäufigkeit als erheblich eingestuft werden kann.

Einer der größten Vorteile der mechanischen Verspannung ist die Einfachheit des Systems, denn alle Baugruppen sind in einem Elektrozyylinder zusammengefasst. Dies erleichtert die Montage stark, da nur Stromleitungen und eventuelle Zusatzbauteile erforderlich sind. Beachtlich ist auch der Kostenvorteil gegenüber einer hydraulischen oder pneumatischen Verspannung. Weitere finanzielle Einsparungen beziehungsweise Energieeinsparungen können durch den direkten Betrieb mit elektrischem Strom erzielt werden. Ein Elektrozyylinder besitzt eine hohe Regelgenauigkeit und Verfahrbewegungen können stufenlos realisiert werden. Ein weiterer erheblicher Vorteil ist, dass konstruktionsbedingt keine Leckagen bei Elektrozyindern auftreten können. Hohe Lebensdauer und ein geringer Wartungsaufwand kann diese Lösungsvariante offerieren.

Die zweite Seite der Medaille zeigt einige Schwächen von Elektrozylindern auf. Problematisch ist, dass bei den meisten Elektrozylindern die Einschaltdauer recht gering ist. Das heißt, dass für den Dauerbetrieb nur wenige Zylinder geeignet sind. Gegenüber hydraulischen Zylindern sind Zug- und Druckkräfte wesentlich geringer. Ein weiteres großes Problem ist, dass bei eventuellen Stromausfällen weder der Sicherheitszustand noch eine Zylinderfahrt realisiert werden kann.

#### 4.3 Variante 2: Hydraulische Verspannung

Der apparative Aufwand gliedert sich grundsätzlich in Antrieb, Steuerung, Abtrieb und Aktorik (Arbeitselement). Der Antrieb besteht aus einem Motor, zum Beispiel ein Elektro- oder Verbrennungsmotor, und einer Hydropumpe, zum Beispiel eine Zahnradpumpe. Die Hydropumpe wandelt mechanische Leistung des Antriebes in Volumenstrom und den zu übertragenden Druck in eine hydraulische Leistung um.

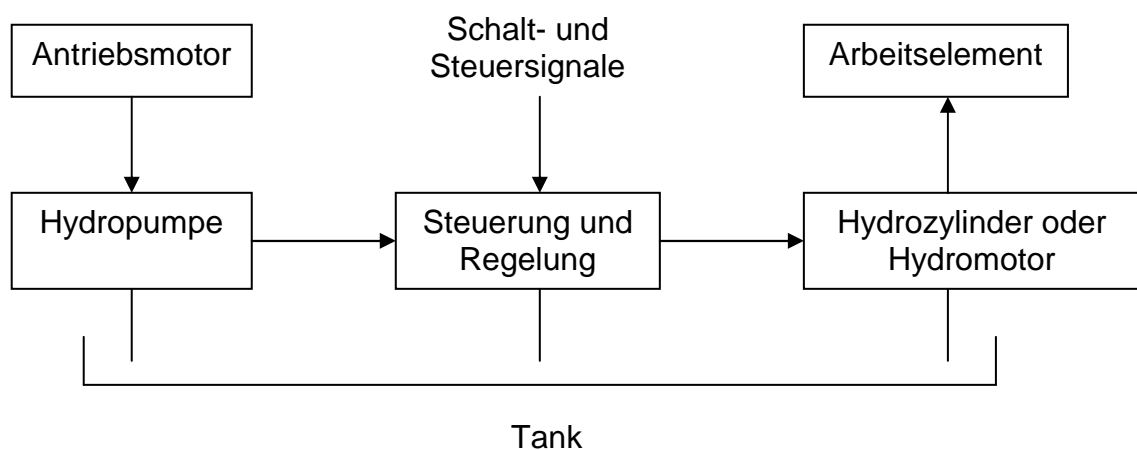


Abbildung 13: Prinzipielle Struktur einer hydraulischen Anlage

Unbedingt notwendig bei hydraulischen Anlagen ist eine Vorratseinrichtung beziehungsweise ein Tank. Der Tank speichert das erforderliche Druckmedium. Zu den wesentlichen Funktionen des Tankes gehören, der Ausgleich der Volumenschwankungen aufgrund der Dichteschwankung bei geänderten

Temperaturen, Reservoir zum Ausgleich von Volumenschwankungen bei geänderten Betriebsbedingungen und auch die Wärmeabführung der durch ins Öl zerstreuten Verluste. Je nach Anforderung muss ein Filter bei der Rückführung der Flüssigkeit eingesetzt werden.

Die Steuer- und Regelung der hydraulischen Einrichtung hat die Aufgabe, durch Taster, Steuer- und Regelvorgänge die Größen Druck und Volumenstrom zu beeinflussen. Steuereinheiten sind zum Beispiel eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), Schalter, Taster und selbstverständlich eine entsprechende Stromversorgung. Die erforderlichen Schalt-, Steuer- und Regelinformationen können von außerhalb der Anlage aufgegeben werden. Unter Verwendung von Ventilen wie Druckbegrenzungsventil, Wegeventile (sind mehrpolige Schalter, die Leitungsverbindungen herstellen oder trennen), Drosselrückschlagventil, Sperrventil und Hydraulikleitungen können verschiedene Bewegungszustände steuern, zum Beispiel Vorlauf, Rücklauf oder Halt.

Im Mittelpunkt steht natürlich der Hydromotor oder Hydrozylinder (einfach- oder doppelt wirkend), der hydraulische Energie in mechanische Energie umwandelt und damit mechanische Arbeit ausführt.

Essentiell ist auch die Funktion der Druckflüssigkeit, diese sind meistens bestimmte Öle. Zu den Aufgaben von Druckflüssigkeiten gehören Leistungsübertragung (verbunden mit Druck- und Bewegungsübertragung), Schmierung von Gleit- und Wälzkontakten, Schutz von Oberflächen (insbesondere vor Korrosion). Zu beachten ist, dass der Anteil an Luft und Wasser im Öl so gering wie möglich gehalten wird, sonst kann bei bestimmten Konstellationen das Betriebsverhalten der Hydraulikanlage sehr negativ beeinflusst werden.

Das Arbeitselement ist der SOFC-Brennstoffzellenstack, der durch die aufgegebene Kraft stabilisierend und verspannend wirkt. Des Weiteren können, je nach Bedarf, zahlreiche Zubehöerteile hinzugefügt werden, wie zum Beispiel eine Kraftmesseinrichtung, die Stärkeverhältnisse anzeigt.



Eine hydraulische Anlage lässt sich durch ihre Eigenschaften sehr gut automatisieren. Fähigkeiten wie eine hohe Lebensdauer, Selbstschmierung (welches durch das Fluid als Kühlmedium dienen kann), robuste Bauelemente und eine gute Regelbarkeit durch die Steuereinheit erleichtern die Automatisierung dieser Variante.

Hydraulische Einrichtungen können große Kräfte auf kleinsten Raum übertragen, das heißt, die Anlage kann mit geringer Dimension eine hohe Leistung offerieren. Ein exakter und feinfühliges Bewegungsablauf ist möglich, da das Druckmedium bei Hydraulik nahezu inkompressibel ist. Des Weiteren kann eine hohe Stellgenauigkeit, stufenlose Geschwindigkeitsstellung des Abtriebes in sehr weiten Grenzen und eine einfache Umkehrung der Bewegungsrichtung erreicht werden.

Die Kosten spielen in der Wirtschaft eine essentielle Rolle, alle Produkte werden und müssen an ihrem PreisLeistungsverhältnis gemessen. Durch den hohen apparativen Aufwand (zum Beispiel die Tankkomponente) bei einer hydraulischen Verspannungsvariante sind die Anschaffungskosten ziemlich preisintensiv. Die aufwendige Konstruktion benötigt einen Behälter (Tank) und die dazugehörigen Bauteile, wie Leitungen (Hin- und Rückführung des Druckmediums), Messeinrichtungen und Regelungs- und Steuerungstechnik. Diese Elemente erhöhen den Aufwand und verteuern den Kostenaufwand.

Das System ist flexibel in der räumlichen Aufstellung und Aufteilung, dieses resultiert aus der Beweglichkeit der Hydraulikschläuche. Die Vorzüge des Systems sind, die stufenlose Einstellung des Antriebs und hohe Regelgenauigkeit durch die geringe Kompressibilität des Druckmediums. Ein weiterer Vorteil ist, dass sehr hohe Kräfte im Vergleich zu pneumatischen und mechanischen Lösungen aufgebracht werden können. Eine hohe Lebensdauer der Bauelemente ist sehr nützlich, denn so verringern sich kostspielige Ausfallzeiten. Ein großer Vorteil ist, dass bei Stromausfällen über eine rein hydraulische manuelle Steuerseite Sicherheit hergestellt werden kann.

Die Flexibilität der Anlage ist ein Vorteil, aber gleichzeitig ist der erforderliche apparative Aufwand ein erheblicher Nachteil, denn die Anschaffungskosten der zahlreichen Komponenten sind hoch. Die Anzahl an Bauelementen ist sehr hoch, daraus resultiert ein hoher Aufwand beim Um- und Aufbau der Anlage. Ebenfalls nachteilig sind die hohen Anforderungen an die Filtrierung der Hydraulikflüssigkeit, sowie der Rückführungsaufwand zum Medienbehälter beziehungsweise Tank. Bei diesem Typ besteht die Möglichkeit von Leckagen, was zu Ausfallzeiten und erhöhten Kosten führen kann.

#### 4.4 Variante 3: Pneumatische Verspannung

Der Aufbau ähnelt der Variante hydraulische Verspannung stark, da beide Technologien auf demselben Prinzip beruhen. Doch die kleinen Unterschiede haben definitiv einen hohen Effekt auf die Funktionsweise der Anlage. Die wesentlichen Differenzen sind, dass Luft als Druckmedium verwendet wird und eine Vorratseinrichtung, wie ein Tank, nicht zwingend nötig ist, da Luft aus der Umgebung genutzt werden kann.

Der apparative Aufwand unterteilt sich grundsätzlich in Druckluftbereitstellung, Druckluftverteilung und -steuerung, Druckluftverbrauch und der Aktorik (Arbeitselement).

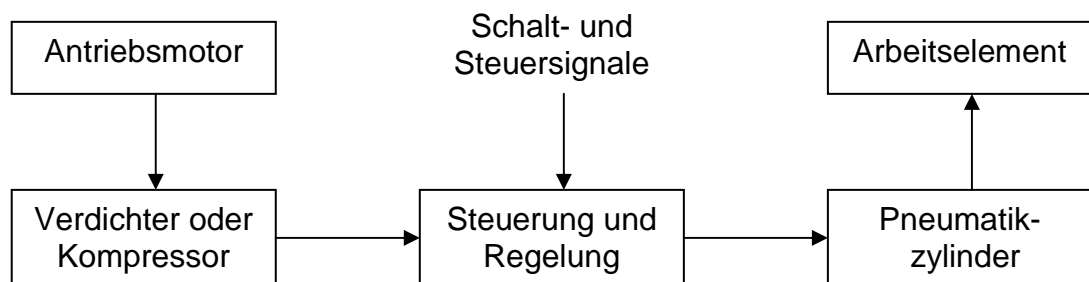


Abbildung 14: Prinzipielle Struktur einer pneumatischen Anlage

Die Druckluftherzeugung beziehungsweise Druckluftbereitstellung wird durch einen Verdichter (Kompressor) realisiert. Mit diesem Kompressor wird Luft

zusammen gedrückt, man spricht auch von Verdichten beziehungsweise Komprimieren. Bei Verdichtungs Vorgängen wird ein vorliegendes Ansaugvolumen mit dem Eingangsdruck zu einem kleineren Volumen zusammengepresst und somit erhöht sich der Ausgangsdruck. Bei Verdichtungsverfahren mit gleich bleibender Temperatur gilt das Boyle-Mariottesche Gesetz. Die Verdichter werden durch einen Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrieben.

Die Steuer- und Regelung der pneumatischen Einrichtung hat die gleichen Aufgaben wie die hydraulische Einrichtung, sie soll durch Taster, Steuer- und Regelvorgänge die Größen Druck und Volumenstrom beeinflussen. Steuereinheiten sind zum Beispiel eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), Schalter, Taster und die entsprechende Stromversorgung. Auch hier können die erforderlichen Schalt-, Steuer- und Regelinformationen von außerhalb der Anlage aufgegeben werden. Die Einheit zur Steuerung der Druckluft einer pneumatischen Anlage braucht Bauteile, welche die Druckluft lenken. Diese Bauteile nennt man Ventile, diese unterteilt man nach Funktion, wie Wegeventile (sind mehrpolige Schalter, die Leitungsverbindungen herstellen oder trennen), Stromventile, Druckventile und Sperrventile und Pneumatikleitungen. Diese Komponenten können verschiedene Bewegungszustände steuern, wie zum Beispiel Vorlauf, Rücklauf oder Halt.

Eine zentrale Rolle nimmt der Druckluftverbraucher, der Druckluftmotor oder Pneumatikzylinder (einfach- oder doppelt wirkend) ein, er wandelt pneumatische Energie in mechanische Energie um und führt damit mechanische Arbeit aus.

Das Druckmedium bei dieser Variante ist, wie der Name schon sagt, Luft. Sie besteht aus 78% Stickstoff, 21% Sauerstoff und aus geringen Anteilen von Kohlenstoffdioxid, Wasser und Edelgasen. Zu den Aufgaben von Druckluft gehören Leistungsübertragung (verbunden mit Druck- und Bewegungsübertragung). Die aufgegebene Kraft wirkt stabilisierend und verspannend auf das Arbeitselement den SOFC-Brennstoffzellenstack. Es können je nach Bedarf viele verschiedene Zubehöerteile hinzugefügt werden,

wie zum Beispiel eine Kraftmesseinrichtung, die Stärkeverhältnisse ablesbar machen.

Eine pneumatische Vorrichtung lässt sich relativ passabel automatisieren. Voraussetzungen wie zum Beispiel eine hohe Lebensdauer der Bauteile und eine gute Steuer- und Regelbarkeit durch die Steuereinheit vereinfachen die Automatisierung dieser Lösungsvariante. Der relativ geringe apparative Aufwand bessert die Automatisierbarkeit zusätzlich, durch den wenigeren Aufwand der Bauelemente wie beispielsweise einem Mediumbehälter (Tank).

Eine pneumatische Anlage hat nur ein geringes Kräftedimensionierungsverhältnis, daraus resultiert, dass pneumatische Einrichtungen für hohe Kräfte eine entsprechend hohe Dimensionierung der Bauelemente (Arbeitszylinder) nötig sind. Grund ist, dass das pneumatische System in geringen Druckbereichen (Standard ist 6 bar, mit Zusatzbausteinen bis zu 25 bar) arbeitet und die Kompressibilität des Druckmediums (Luft) hoch ist. Die pneumatische Variante kann nur eine mittlere Stellgenauigkeit und eine stufenlose Geschwindigkeitsstellung des Abtriebes anbieten.

Aus dem geringen apparativen Aufwand folgt eine Verringerung der eingesetzten Bauteile, jedes Element, was gespart werden kann, bringt einen positiven Kosteneffekt mit sich. Die diversen Einschränkungen wie Druckbereich und Kompressibilität erfordern erhöhte Ausmaße des Arbeitszylinders, was wiederum eine überschaubare Kostenmehrung bedeutet. Je höher die Anforderungen, desto relevanter die Kostenerhöhung.

Eine pneumatische Anlage besitzt den Vorteil, dass auf einen gewissen apparativen Aufwand verzichtet werden kann, wie zum Beispiel einem Tank für Druckmedien oder eine Filtrierungsanlage. Die Anlage ist simpel und funktional aufgebaut, das heißt, eine einfache Handhabung bei der Montage und bei eventueller Wartung. Der Wartungsaufwand bei dieser Variante ist gering. Die Luft als Druckmedium ist immer vorhanden und verursacht keinen Kostenaufwand, ebenso bewirkt die Luft keinerlei Umweltverschmutzung.

Genau wie bei der hydraulischen Verspannung kann bei Stromausfällen über eine rein pneumatische manuelle Steuerseite Sicherheit hergestellt werden.

Die Kräfte einer pneumatischen Anlage sind nicht besonders hoch. Nur wegen geringer Regelgenauigkeit der Kompressibilität von Luft sind Festanschläge erforderlich. Die Druckluftaufbereitung ist sehr aufwendig und kostspielig. Leckagen können schwerwiegende Folgen haben, wie einen erhöhten Energieverbrauch.

#### 4.5 Variantenauswahl

Eine übersichtliche Gegenüberstellung der Varianten erleichtert die Auswahl und erhöht die Anschaulichkeit. Die Vorzüge und Schwächen der jeweiligen Varianten werden in einer Vergleichstabelle mit den wichtigsten Kriterien dargestellt.

Kriterium	Variante 1 Mechanische Verspannung	Variante 2 Hydraulische Verspannung	Variante 3 Pneumatische Verspannung
Aparativer Aufwand	++	-	+
Automatisierbarkeit	++	++	++
Regelgenauigkeit	++	++	+
Kostenaufwand	++	--	+
Kraftaufbringung	-	++	-
Überlastsicherheit	-	++	++
Energieversorgung (Druckerzeugung)	++	++	++
Lebensdauer	+	-	+
Wartung und Austauschbarkeit	++	-	+
Einsatz bei Explosionsgefahr	--	-	+

Tabelle 1: Zeigt die Einstufung der Varianten in den verschiedenen Kategorien

Die Auswahl der geeigneten Variante wird anhand von Kriterien und Voraussetzungen erwogen. Der Vergleich zwischen den Varianten und die größtmögliche Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil sind

ausschlaggebend. Die korrekte Deutung der Eigenschaften gegenüber dem Anforderungsprofil ist essentiell.

Der apparative Aufwand ist bei der mechanischen Verspannungsvariante am günstigsten, denn bei ihr kommen nur wenige Komponenten zum Einsatz. Je weniger Komponenten verwendet werden, umso einfacher gestaltet sich das System. Ein wenig umfangreicher ist die pneumatische Verspannung, mit maximalem apparativen Aufwand ist bei der hydraulischen Variante zu rechnen.

Bei allen Auswahlmöglichkeiten ist die Automatisierbarkeit äquivalent hoch, das bedeutet, alle Varianten lassen sich sehr gut automatisieren. Hohe Regelgenauigkeit beziehungsweise Wiederholgenauigkeit können hydraulische und mechanische Verspannung offerieren. Die pneumatische Variante kann keine so hohe Regelgenauigkeit anbieten, da das Medium Luft sehr stark kompressibel ist. Allerdings hat die Kompressibilität bei der Dimension der Anlage nur geringen Einfluss.

Die Fähigkeit, hohe Kräfte zu erzeugen beziehungsweise zu übertragen, ist bei der Kraftaufbringung sehr wichtig. Die höchsten Kräfte bei gleichem Kolbendurchmesser können Hydraulikzylinder übertragen, wesentlich geringere Kräfte können Pneumatik- und Elektrozyylinder übertragen. Die Kraftaufbringung ist in der Gesamtbetrachtung allerdings nur zweitrangig.

Die Überlastsicherheit verhindert Schäden und sichert Komponenten bei zu großen Belastungen, die pneumatische und hydraulische Variante könnten an dieser Stelle hohe Sicherheit anbieten. Die mechanische Methode ist aufgrund von konstruktiven Gegebenheiten beim Überlastverhalten eingeschränkt.

Energieversorgung oder auch Druckerzeugung ist bei allen Varianten in hohem Maße abgesichert. Die Lebensdauer ist ein sehr hoch zu bewertender Faktor, sie schützt vor zusätzlichen Aufwendungen. Die pneumatische und mechanische Verspannung bieten eine hohe langfristige Belastbarkeit, aufgrund der größeren Belastung bei der hydraulischen Verspannung ist die Lebensdauer nicht so hoch zu bewerten. Ein mit Lebensdauer verwandter

Komplex ist die Wartung und Austauschbarkeit. Sie beschreibt, wie aufwendig beziehungsweise wie kompliziert das Implementieren von Ersatzkomponenten ist.

Die mechanische Variante ist sehr gut austauschbar, da nur eine geringe Anzahl an Teilen oder Komponenten verwendet wird. Ebenfalls günstige Voraussetzungen hat die pneumatische Variante. Aufgrund vieler Komponenten und Komplexität kann die hydraulische Variante nur geringe Fähigkeiten in diesem Bereich bereitstellen.

Die Sicherheit ist von essentieller Bedeutung, um das Gefahrenpotenzial so gering wie möglich zu halten. Der Einsatz bei Explosionsgefahr ist somit ein bedeutender Aspekt, am besten geeignet ist die pneumatische Verspannungsmethode, weniger günstig ist die hydraulische Verspannungsmethode, sehr schlechte Eigenschaften zeigt die mechanische Verspannungsmethode im Einsatz bei Explosionsgefahr.

Außerordentlich wichtig ist die Wirtschaftlichkeit, der Kostenaufwand ist einer der entscheidenden Faktoren in der heutigen Ökonomie. Der geringste Kostenaufwand entsteht bei der mechanischen Verspannungsvariante, ähnlich aber weniger günstig ist die pneumatische Verspannungsvariante. Am teuersten gestaltet sich die hydraulische Verspannungsvariante mit großem Kostenaufwand.

Nach genauer Analyse wurde eine Variante ausgewählt. Der Vergleich zwischen Voraussetzungen und Anforderungen der EBZ GmbH und den Profilen der einzelnen Verspannungsvarianten führte zu einem Ergebnis. Die Auswahl der zu realisierenden Variante fiel auf die pneumatische Verspannungsmethode, weil das Profil am besten zu den Voraussetzungen passt. Die Variante, mechanische Verspannung, ist ebenfalls sehr attraktiv, aber da eine hohe Dauerbelastung zu Verfahrenstörungen führen kann, ist die Bewertung negativ ausgefallen. Aufgrund von hohen Kosten und apparativem Aufwand konnte die hydraulische Verspannungsmethode nicht berücksichtigt werden.

## 5. **Entwurf der Verspannvorrichtung**

Der Entwurf der Verspannvorrichtung dokumentiert den Einbau der ausgewählten pneumatischen Verspannungsvariante in das SOFC-Brennstoffzellensystem. Ebenfalls werden Schaltpläne dargestellt, Komponenten erläutert und außerdem FEM-Analysen und Berechnungsnachweise geführt.



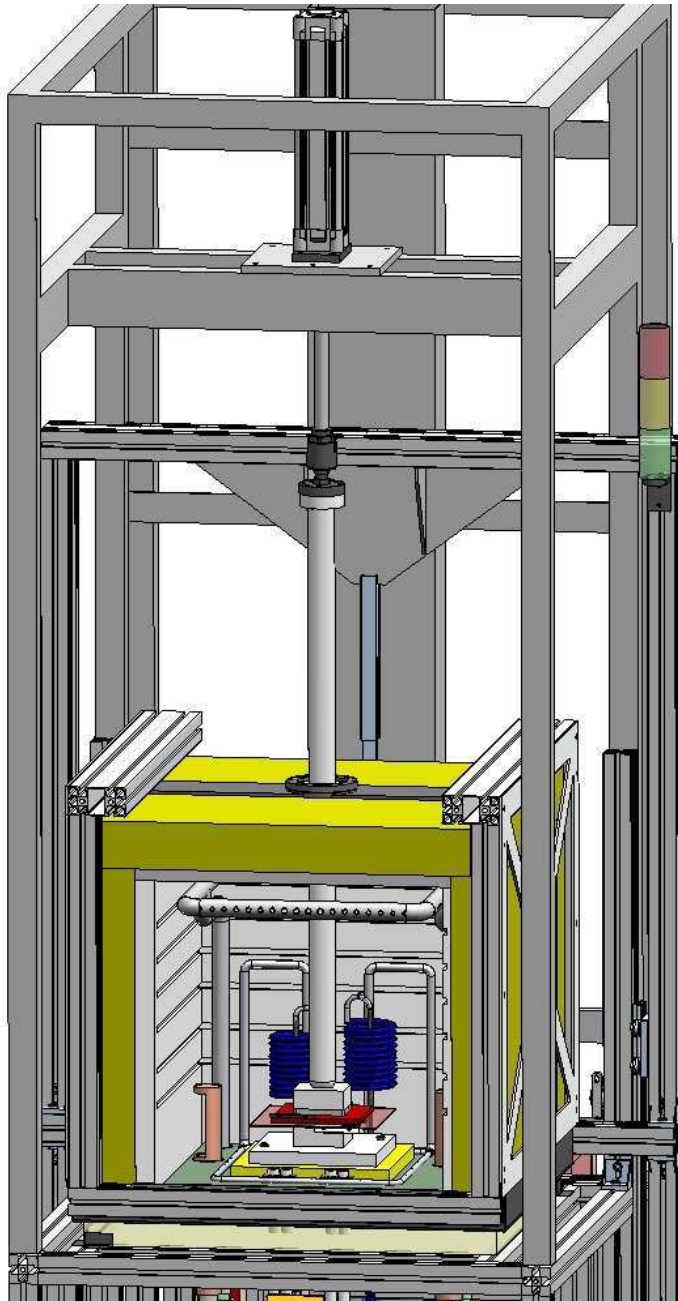


Abbildung 15: Zeigt den Entwurf der pneumatischen Verspannungseinrichtung

### 5.1 Auswahl und Anordnung der Komponenten

Die Auswahl der Komponenten ist grundlegend für die Anordnung und Funktionsweise der pneumatischen Verspannungseinrichtung. Um eine möglichst günstige Auswahl hinsichtlich Kosten, Anordnung und Funktion zu finden, wurden die Komponenten in enger Zusammenarbeit mit der Festo AG &

Co. KG ausgewählt. Die Festo AG & Co KG ist ein sehr bekanntes Unternehmen im Bereich der Automatisierungstechnik.

Das VPPM Proportional-Druckregelventil besitzt einen zweistufigen Regelkreis für stabile und präzise Regelcharakteristik und auch eine elektrische Sollwertvorgabe. Es können passende Regelungsarten aus 3 Presets per Knopfdruck gewählt werden, diese gliedern sich in schnelle, universelle oder präzise Presets. Das gewählte Druckregelventil arbeitet in einem Druckbereich von 0...10 bar und die Gesamtgenauigkeit beträgt 1%. Durch einen zweistufigen Regelkreis kann mit dem Festo Multi-Sensor-Control optimale und robuste Regeleigenschaften erreicht werden.

Das Magnetventil Ventile Compact Performance CPE ist ein Steuerventil, das sich durch minimale Baubreite und geringe elektrische Leistungsaufnahme bei höchsten Durchflusswerten auszeichnet. Es ist ein sehr variabler Einbau durch Einzelmontage möglich, kurze Schalt- und kürzeste Reaktionszeiten werden erreicht.

Die Wartungsgeräte-Kombination besteht aus mehreren Bauteilen, wie Hand-Einschaltventil, Filter-Regelventil, Abzweigmodul und Druckschalter, ohne Steckdose, mit Befestigungswinkeln. Es ist eine robuste und vielseitige Wartungsgeräteeinheit, die zahlreiche Möglichkeiten bei Filter- und Feinfilterstufen anbietet. Die Funktionen reichen von Regelung, Filtrierung (auch Feinfiltrierung) bis hin zu Ölung und Verteilung.

Der Druckbooster DPA kann das Druckniveau ändern, er kann niedrigen Druck in höheren transferieren. Der DPA gehört zu den Doppelkolbendruckübersetzern, die ausschließlich Luft verdichten können. Wird der Druckbooster entsprechend mit Druckluft beaufschlagt, sorgen integrierte Wege- und Rückschlagventile automatisch für sekundärseitigen Druckaufbau, je nach Durchfluss bis zum doppelten Wert des Betriebsdruckes. Die Luftversorgung der beiden Antriebskolben wird durch ein pneumatisches Wegeventil übernommen, bei Erreichen der Hubendstellung wird automatisch umgesteuert. Zur Einstellung des Sollwerts ist ein manuell bedienbarer Regler

integriert, der die Arbeitskolben mit Druckluft versorgt und eine stabile Funktionsweise gewährleistet.

Der Druckluftspeicher CRVZS-5 dient als Reservoir, das bei schlagartig auftretendem Druckluftverbrauch und zum Ausgleich von Druckschwankungen eingesetzt wird. In Verbindung mit Drosselventilen können Verzögerungszeiten für den Druckaufbau erreicht werden. Für schnell taktende Antriebe können größere Druckluftmengen zur Verfügung gestellt werden.

Das Präzisions-Druckregelventil reguliert den Arbeitsdruck (Sekundärseite) über eine Membranvorsteuerung, die auf den Hauptsitz einwirkt und dadurch eine bessere Regelcharakteristik erreicht. Präzise Druckeinstellungen sind sowohl im statischen als auch im dynamischen Einsatz möglich und das Regelventil hat ein gutes Ansprechverhalten bei schnellen Änderungen von Eingangsdruck oder Durchfluss. Eingangsdruckschwankungen können nahezu kompensiert werden.

Das Fronttafelventil ist ein simples 3/2-Grundwegeventil für verschiedene, durch Muskelkraft betätigte Aufsätze, besonders geeignet für den Fronttafeleinbau. Die Ventile haben ein sicheres Kupplungssystem für schnelle Montage und Demontage.

Der Normzylinder DNC nach ISO 15552, mit einem Profilzylinderrohr, ist für berührungslose Positionserkennung geeignet. Der DNC ist ein doppelt wirkender Pneumatikzylinder mit beidseitig einstellbarer Endlagendämpfung oder auch elastischen Dämpfungsringen in den Endlagen. Der Kolbendurchmesser beträgt 63 mm und die Hublänge ist 250 mm, außerdem befindet sich ein Außengewinde, für verschiedene Anschlusskomponenten, an der Kolbenstange. Die kompakte Konstruktion spart bis zu 11% Einbauraum gegenüber herkömmlichen Pneumatikzylindern.

In dieser Kategorie sind verschiedene Komponenten zusammengefasst, die eine geringe Baugröße besitzen und Teile, die nur übertragende Aufgaben

ausführen. Diese Komponenten sind trotzdem ein wichtiges Segment des gesamten Systems, den ohne sie kann keine Funktion statt finden.

Die Reduziernippel sind zur Abdichtung bei Profilveränderungen vorgesehen. Das Rückschlagventil kann gesteuert werden und je nach Steuersignal wird der Druckluftfluss unterbrochen oder nicht. Das Drosselrückschlagventil mit Abluft- oder Zuluftdrosselung wird zur Regulierung der Abluftmenge bei doppelt wirkenden Antrieben verwendet. Ein Manometer wird verwendet, um an ausgewählten Stellen Druck zu messen und zu kontrollieren. Schalldämpfer sind zur Geräuschkürzung an Entlüftungsanschlüssen von Pneumatikkomponenten vorgesehen. Der Drucktaster ist ein Aufsatz zur Steuerung von Ventilen über Muskelkraftbetätigung. Die Flexo-Kupplung ist ein Bauteil, welches eine Verbindung zwischen den bewegten Maschinenteilen und der Kolbenstange des Zylinders herstellt. Zu den Aufgaben gehört, der Ausgleich von Winkelabweichung und Mittenversatz (Fluchtungsfehler). Einige weitere kompakte Bauteile komplettieren das System. Zu diesen Komponenten zählen Steckdosenleitungen, Winkeldosen, Befestigungswinkel, Reglersicherungen, verschiedene Arten von Steckverschraubungen (wie L- und T-Steckerschraubungen beziehungsweise Steckverbindungen), Oder-Glieder, Schlossschalter, Drucksensoren, Schalldämpfer, Flanschbefestigungen und selbstverständlich die Verbindungsleitungen.

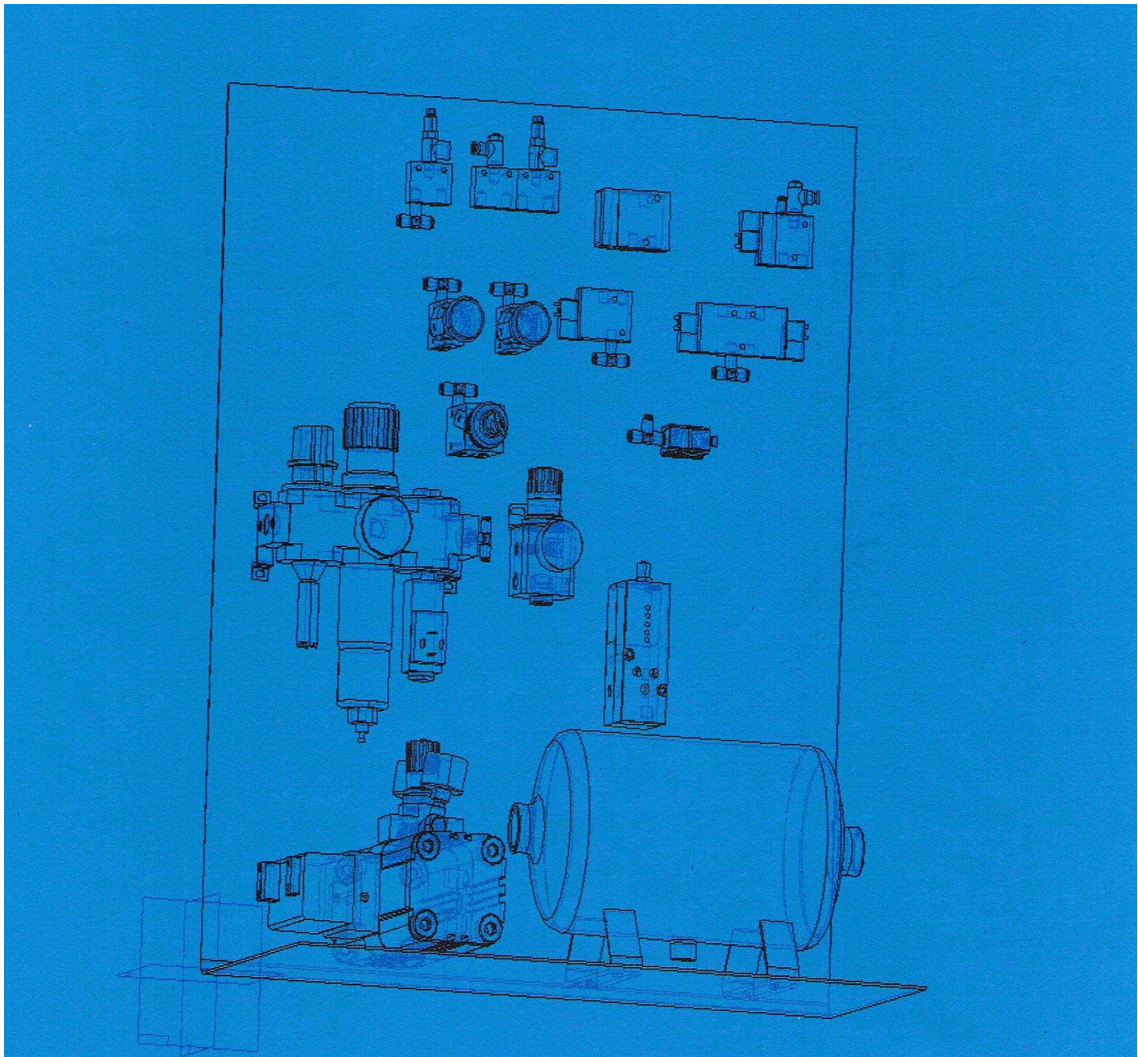


Abbildung 16: Zeigt die Entwurfsanordnung der pneumatischen Komponenten auf der Montageplatte

## 5.2 Berechnungsnachweise

Die Finite Element Methode (FEM) ist numerisches Simulationsverfahren im Ingenieurwesen. Mit ihr können verschiedene physikalische Zweige berechnet werden. Bei der Kalkulation werden Zonen in Linien und Flächen (Elemente) unterteilt. Die Anzahl der Elemente ist endlich (finit), sie besitzen folglich eine endliche Zahl an Parametern und können so berechnet werden. Die Finite Element Methode wird genutzt, um Objekte zu rationalisieren und qualitativ zu optimieren. Schutz und Sicherheit sind wesentliche Kriterien für den Einsatz

bestimmter Materialien und Dimensionierungen. Um die Sicherheit des Systems zu gewähren, müssen entsprechende Nachweise geführt werden.

Die Kraft, die senkrecht von oben auf den Stack wirkt, muss geeignet aufgenommen und abgeleitet werden. Das heißt, es bedarf eines Nachweises der Unterlagen (Platten) des Brennstoffzellenstacks. Dieser Sicherheitsnachweis wird mit dem FEM-Tool des SolidWorks 2008 (Studentenversion) geführt. Eine Sicherheitsprüfung für 7 unter dem Stack befindliche Platten wird durchgeführt. Die Unterlagen dienen nicht nur zur Aufnahme der Belastung, sondern im Wesentlichen zum abführen und dämmen der im Ofen herrschenden Temperaturen. Die unterste und letzte Platte wird an dem Teststandträgergerüst mit einer Schraubenverbindung fixiert.

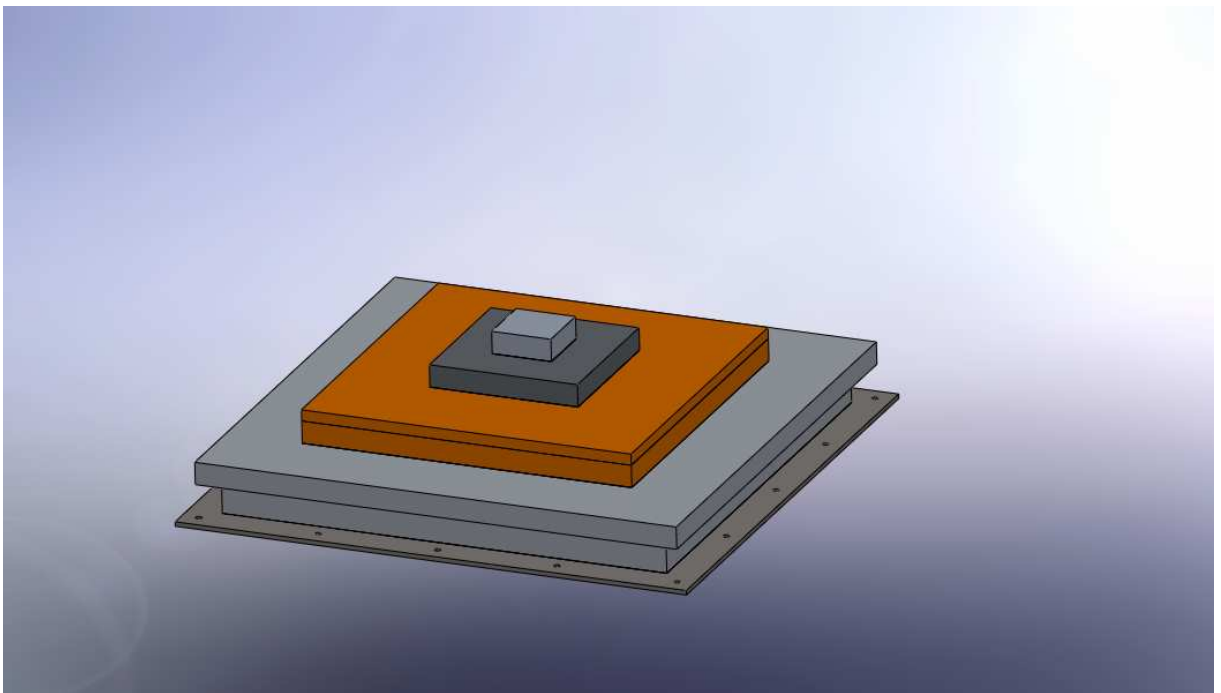


Abbildung 17: Zeigt die gesamten Unterlagen des Brennstoffzellenstacks (Stack ist nicht dargestellt)

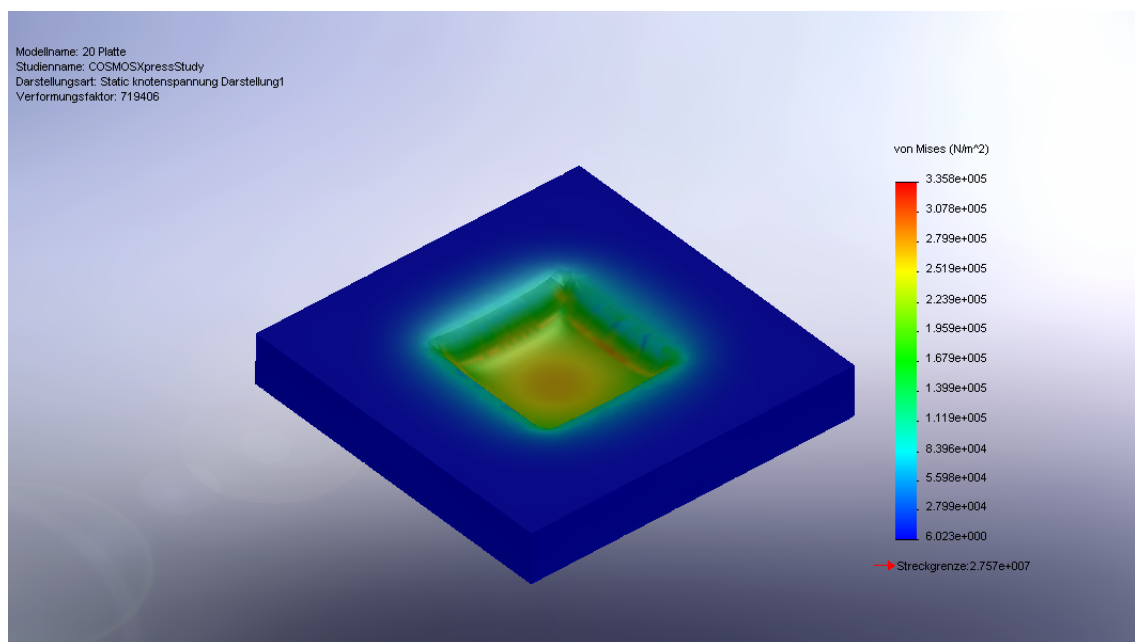
Die Unterlagen bestehen teilweise aus verschiedenen Materialien. Die Platte 1 besteht aus handelsüblichem Aluminiumoxid. Die Platte 2 aus DEGUSSIT, das ist eine Oxidkeramik der Firma FRIATEC AG. Die Nummer 3 ist aus CORDIERIT, ein feuerfester keramischer Werkstoff. Die Platten 4 und 5 sind



aus KVS, es ist eine Mischung aus Aluminiumsilikat- und Aluminiumoxidwolle, Füllstoffen und Bindemitteln. Die 6. Unterlage ist aus WDS Ultra, einem thermischen Dämmstoff, dessen Hauptbestandteil eine hochdisperse Kieselsäure ist. Die Abschlussplatte Nummer 7 besteht aus handelsüblichen Edelstahl (1.4301).

Plattenreihenfolge (von oben nach unten)	1	2	3	4	5	6	7
Material	Aluminiumoxid	DEGUSSIT	CORDIERIT	KVS	KVS	WDS Ultra	Edelstahl (1.4301)
Dimension							
Höhe (in mm)	30	30	15	30	30	45	5
Breite (in mm)	80	200	445	445	650	600	690
Länge (in mm)	80	200	445	445	650	600	690
Sicherheitsfaktor	<b>31,3</b>	<b>88,1</b>	<b>400,0</b>	<b>569,3</b>	<b>1307,2</b>	<b>9,6</b>	<b>12,7</b>
max. Verschiebung (in mm)	4,04E-05	2,78E-05	6,42E-06	2,27E-06	1,69E-06	2,19E-01	3,24E-02

Tabelle 2: Darstellung der Sicherheitsfaktoren der einzelnen Platten



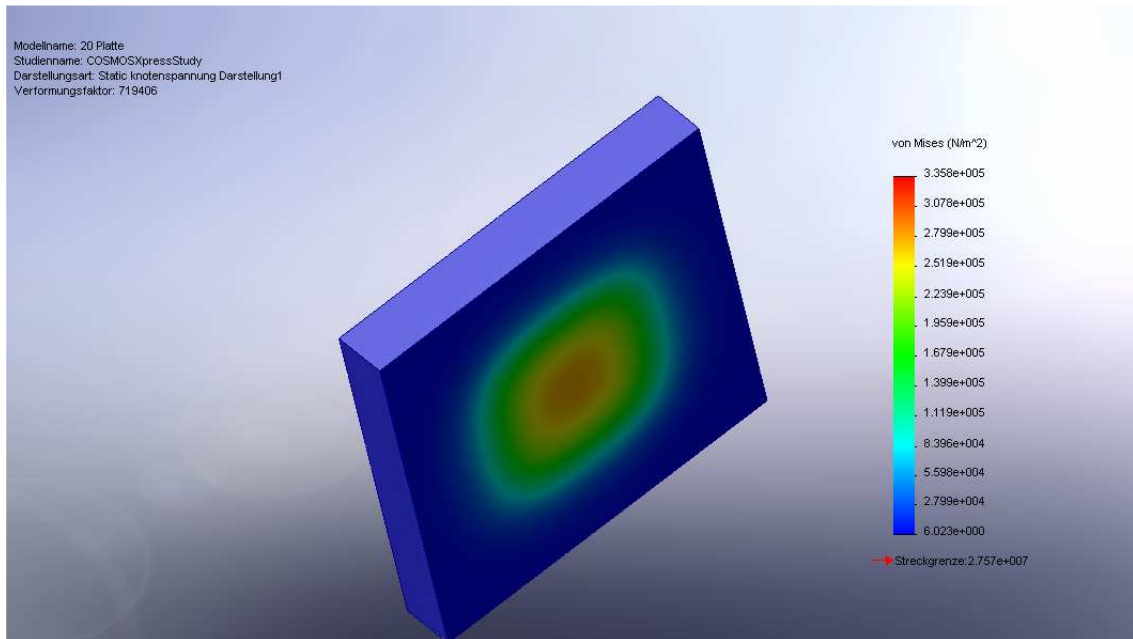


Abbildung 18 und 19: Die Platte 2 wird mit der ihrer vorhandenen Vergleichsspannung (von Mises) dargestellt. Die Verformungen sind zur Verdeutlichung überspitzt angezeigt.

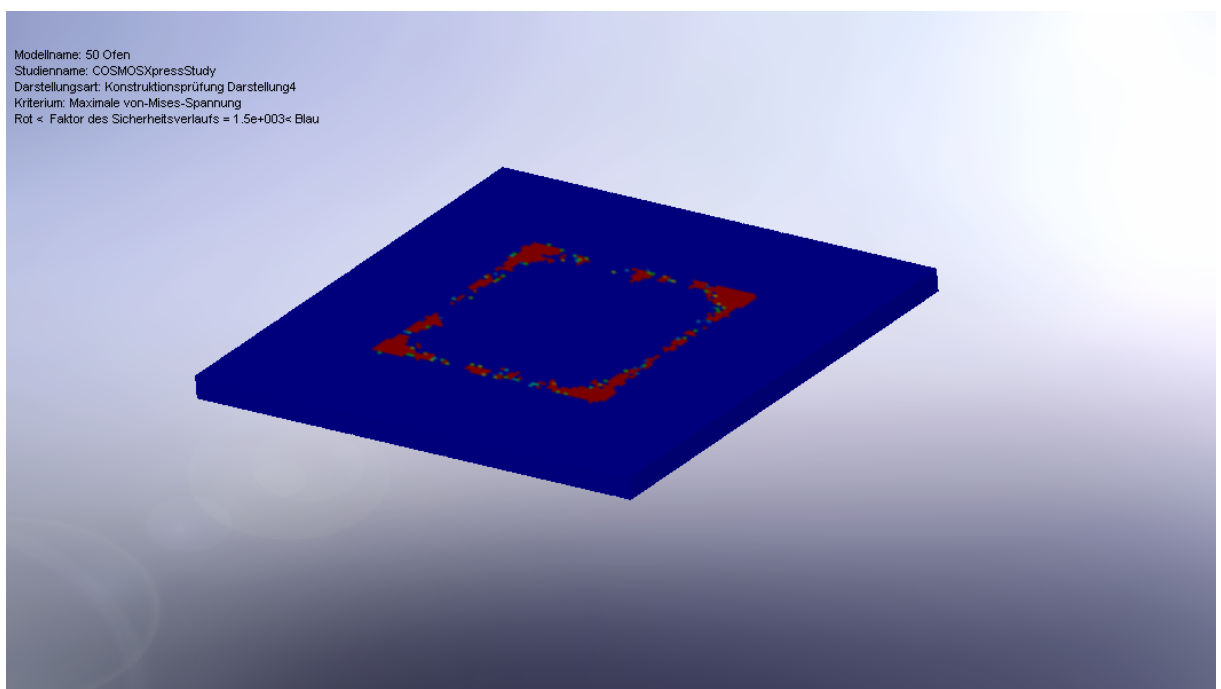


Abbildung 20: Darstellung der Platte 5 mit einem Sicherheitsfaktor von 1490. Die rot gekennzeichneten Zonen besitzen eine Mindestsicherheit von 1307, doch bei 1490 ist eine plastische Verformung bis hin zum Bruch vorhanden.



Die Tabelle 2 zeigt den Sicherheitsfaktor und die maximale Verschiebung der jeweiligen Platte an. Die Sicherheiten sind mitunter sehr hoch, wie beispielsweise bei der Platte 5 mit einem Faktor von 1307. Folglich wäre eine Verringerung der Abmessung eine Möglichkeit, um Kosten zu reduzieren. Eine rein formelle Reduzierung der Abmessungen, um den Sicherheitsfaktor auf ein normales Niveau zu befördern, ist sicherlich sinnvoll. Die Abmessungen können allerdings nicht vermindert werden, da sonst die thermischen Eigenschaften verschlechtert würden. Eine Vergrößerung wäre durchführbar, aber aufgrund der Sicherheitsfaktoren nicht notwendig. Bei der ersten Berechnungsphase konnte die Platte Nummer 7 nur eine Sicherheit von 1,5 vorweisen, da dieser Wert recht gering ist, wurde eine günstigere Lagerstrategie entwickelt. In der zweiten Berechnungsphase wurden dadurch die Ergebnisse erheblich verbessert, der Sicherheitsfaktor liegt nun bei 12,7. Ebenfalls konnte die maximale Verschiebung verringert werden.

Die Knickbelastung ist ein wichtiger Indikator für die Sicherheit, denn sie gibt an, bei welcher Belastung eine plastische Verformung einsetzen kann. Zur Berechnung der Knicklast wird die Keramikstange aus Aluminiumoxid herangezogen, die den Zylinder mit der Brennstoffzelle verbindet. Allerdings ist in diesem Fall mit einer relativ hohen Sicherheit zu rechnen, da die Belastungen gegenüber der Dimension des Zylinders klein sind. In der Tabelle 3 sind Voraussetzungen für die Berechnung angegeben.

$$F_{Kzul} = \frac{\Pi^2 \cdot E \cdot I}{s_K^2 \cdot \nu_{Kerf}}$$

Euler-Fall	4	
E-Modul	340.000	N/mm <sup>2</sup>
d innen	32	mm
d außen	40	mm
I-Moment	74191,85211	mm <sup>4</sup>
l	975	mm
s <sub>k</sub>	487,5	mm
v Kerf	2	
F	2.500,00	N
F <sub>Kzul</sub>	<u>523.788,11</u>	N

Tabelle 3: Zeigt die Berechnungsgrundlage für die Knickbelastung an

Wie erwartet, ergibt sich ein sehr hohes F<sub>Kzul</sub>, das heißt, es besteht nicht die geringste Gefahr, dass die keramische Stange sich plastisch verformt.

### 5.3 Schaltplan und Steuerung

Der Schaltplan ist die grafische Darstellung einer pneumatischen Schaltung. Sie ist eine abstrahierte Abbildung der pneumatischen Funktionen und der Gasverläufe, es werden die realen Anordnungen und die Gestalt der jeweiligen Komponenten nicht berücksichtigt. Außerdem zeigt der Schaltplan alle Arbeits- und Steuerschaltkreise, die Schritte des Arbeitsablaufs, die Komponenten der Schaltung mit ihrer Kennzeichnung sowie die Leitungen und Verbindungen.

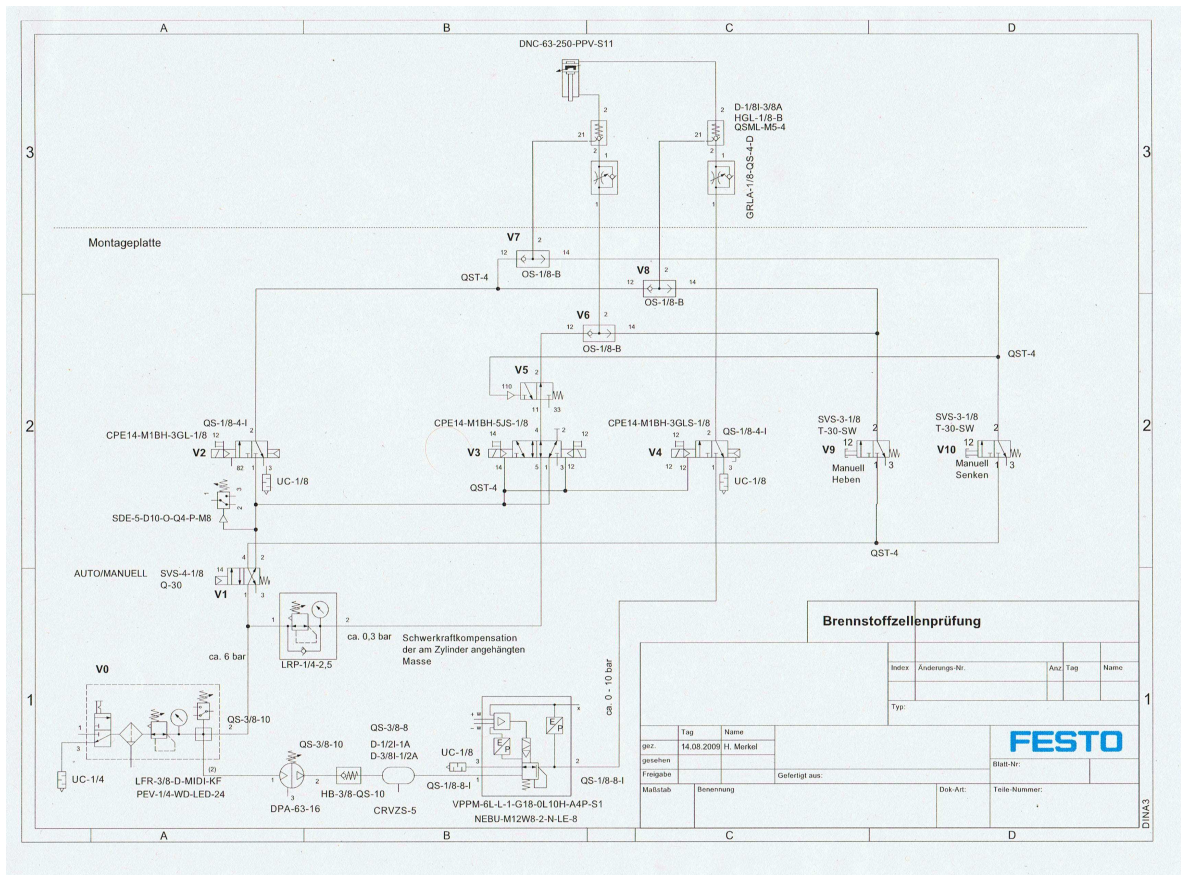


Abbildung 21: Schaltplan des pneumatischen Verspannungssystems

Die Steuerung des Zylinders erfolgt über die Ventile. Der Schaltplan wurde so entwickelt, dass zwei Steuerarten möglich sind. Sie unterscheiden sich in manuelle und automatische Steuerseite. Bei der manuellen Steuerseite können die Funktionen drucklose Zylinderausfahrt (über Ventil V9) und Zylindereinfahrt (über Ventil V10) über Drucktaster geregelt werden. Bei der automatischen Steuerseite können die Funktionen Zylinderausfahrt (über Ventile V2 und V4) und Zylindereinfahrt (über Ventile V2 und V3) über die Software geregelt werden. Außerdem kann über die Software eine definierte Kraft übertragen werden.

## 5.4 Kostenschätzung

Der Kostenaufwand ist einer der wesentlichsten Faktoren in von hoher Wirtschaftlichkeit geprägten Zeiten. Somit hat der finanzielle Aufwand einen

großen Einfluss auf die gewählte Variante. Nach der Summation der einzelnen Kosten der Komponenten, musste mit einem Aufwand von etwa 3000 Euro gerechnet werden. In Zusammenarbeit mit der Firma Festo AG & Co. KG, einem bekannten Kooperationspartner der EBZ GmbH, konnte ein Angebot für eine pneumatische Verspannung mit entsprechendem Anforderungsprofil entwickelt werden. Gemäß dem Angebot wurde ein Auftrag zur Lieferung der nötigen Komponenten erteilt. Im Rahmen des Bachelorprojektes werden die Montagearbeiten durchgeführt, folglich konnte dieser Kostenfaktor stark minimiert werden. Durch schon bestehende Verbindungen zur Festo AG & Co. KG und dem Umfang des Angebots wurde ein Kundenrabatt von 10% erzielt.

## **6. Funktionstest**

Der Funktionstest ist eine Notwendigkeit, um zu gewährleisten, dass das System im Rahmen seiner Vorgaben arbeitet. Zu den Vorgaben gehören: Einstellung der Druckparameter für Drucksensoren, manuelle und automatische Schaltfunktionen der verschiedenen Ventilkombinationen (insbesondere drucklose Zylinderfahrten), Ermittlung der Schwerkraftkompensation (ausgleichen der Masse der Stempelkonstruktion), Funktion des Druckluftspeichers, Prüfung des maximalen Fehlers der Kraftübertragung (maximaler Fehler darf nicht größer als  $\pm 2,5$  kg sein). Es werden verschiedene Funktionstests in Etappen durchgeführt, um einen Überblick zu behalten und um Fehlerursachen leichter isolieren zu können.

Der Themenbereich Einbauverfahren beschäftigt sich mit der Art und Weise, wie das System aufgebaut wird. Die nötigen Bauteile wurden bei der Firma Festo AG & Co. KG bestellt. Nach entsprechender Lieferfrist trafen die Komponenten ein. Priorität lag als erstes in der Prüfung der Vollständigkeit und Funktionstüchtigkeit des Lieferumfanges. Laut Lieferliste waren alle Komponenten korrekt in richtigem Umfang vorhanden, doch beim Einbau tauchten ein paar Defizite auf, wie beispielsweise fehlende Stopfen, Reduziernippel oder eine Ablassschraube für die Druckspeichereinheit.

### **6.1 Test der manuellen Steuerseite**

Für den ersten Funktionstest ist es wichtig, die manuelle Steuerseite zu montieren, um die Zweckmäßigkeit des Systems zu gewährleisten. Die manuelle Steuerseite ist ein Teilabschnitt des gesamten Systems, doch gut geeignet, um einen grundlegenden Funktionstest durchzuführen. Der Vorteil der manuellen Steuerseite liegt darin, dass keine elektronische Ansteuerung benötigt wird. Bei der Montage ist hohe Konzentration und genaues Arbeiten unerlässlich, denn Fehler sind in folgenden Montagephasen schwer zu kompensieren und führen zu hohen Verzögerungszeiten. Der Aufbau der

manuellen Steuerseite verlief ohne Komplikationen und konnte zeitnah realisiert werden.

Nach dem erfolgreichen Aufbau der manuellen Steuerung könnte ein Funktionstest absolviert werden. Dieser Versuch ist ein rein formeller Test der Funktion der Komponenten außerhalb des eigentlichen Versuchsstandes. Die Anlage wurde durch den Anschluss am lokalen Druckluftnetz komplettiert. Druckluftventile wurden auf 3 bar (für den Funktionstest wird ein geringerer Druck als im Betriebsmodus verwendet) eingestellt, dieser Druck ist ausreichend, um die Funktion der Anlage zu testen. Im ersten Funktionstest konnte ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden, bis auf kleinere Einstellungsabstimmungen an den Drosselrückschlagventilen, die selbstverständlich entsprechend reguliert wurden. Der Test beinhaltete verschiedene Zylinderfahrten, die über die manuelle Steuerseite geregelt wurden.

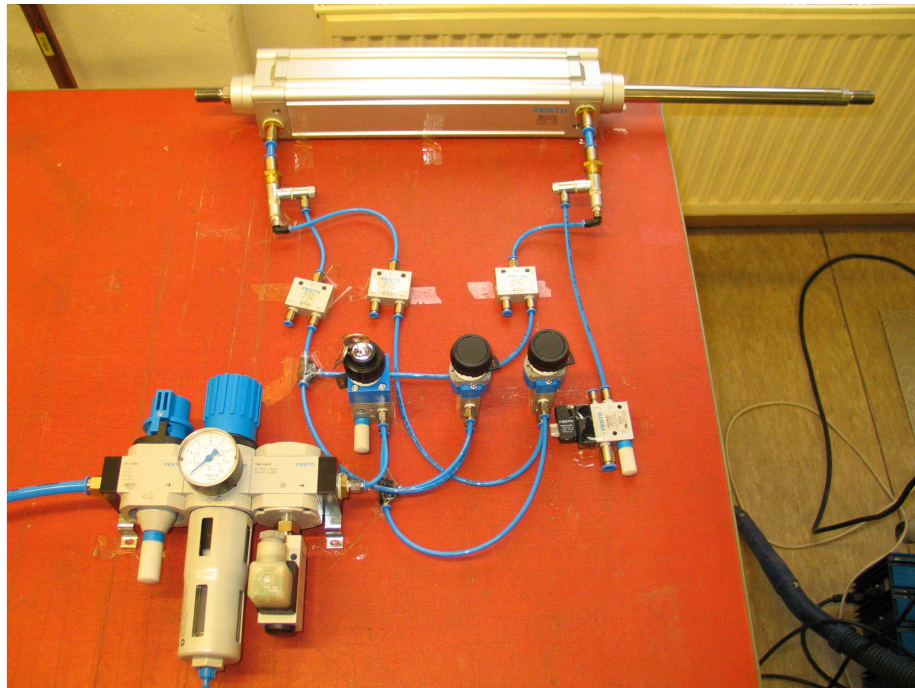


Abbildung 22: Zeigt den Aufbau des Tests der manuellen Steuerseite

Nach dem Erhalt der Montageplatte konnten die Bauteile auf ihr verteilt und der Versuchsaufbau vervollständigt werden. Ein wichtiger Gesichtspunkt war die

möglichst hohe Kompaktheit des Systems, das heißt eine platz sparende Verteilung der Komponenten war notwendig. Nach der Montage der Bauteile auf die Platte konnten weitere Funktionstests angeschlossen werden. Der erste Test war die Wiederholung des Funktionstests der manuellen Steuerseite. Dieser Funktionstest wurde mit Erfolg durchgeführt. Darauf folgte der Funktionstest des Druckboosters, dafür wurde ein Nadelventil mit Schalldämpfer zwischen Druckluftspeicher und Proportional-Druckregelventil installiert, um eine ordnungsgemäße Entlüftung des Systems zu gewährleisten. Diese Änderung konnte sich im Test hervorragend bewähren, und wurde somit als Nachbesserung in den Versuchsaufbau integriert. Der Funktionstest verlief ebenfalls erfolgreich. Der Druck konnte von 2 bar auf 4 bar verdoppelt werden, damit beweist die Druckboostereinheit ihre Funktionsfähigkeit.

## **6.2 Test der automatischen Steuerseite**

Um ein Funktionstest der automatischen Steuerseite zu realisieren, muss die manuelle Steuerseite funktionstüchtig und die Software muss funktionsgerecht intakt sein. Es wäre möglich die automatische Steuerseite auch ohne funktionierende manuelle Steuerseite zu testen, aber bei eventuellem Stromausfall könnte kein Sicherheitszustand hergestellt werden. Der zweite wichtige Punkt ist, dass die Software entsprechend funktionsfähig sein muss und natürlich müssen ebenfalls Hardwareanschlüsse für Magnetventile und Druckschalter vorhanden sein. Die grundlegende Voraussetzung ist der Anschluss an einem Lokaldruckluftnetz.

Die Montageplatte mit den pneumatischen Komponenten wurde in das Versuchsstandgestell platziert und fixiert. Hardwareanschlüsse der Magnetventile und Druckschalter wurden an die Messbox angeschlossen. Die Messbox ist ein Übergangsglied zwischen Hardware und Software. Über eine Computereinheit kann die Messbox elektrische Signale senden oder empfangen. Die elektrischen Signale dienen zur Verarbeitung von Informationen beziehungsweise zur Vorgabe von bestimmten Werten durch die Software. Der Pneumatikzylinder wurde über dem Ofengestell im



Versuchsstand installiert. Natürlich wurden die notwendigen Pneumatikschläuche und die Komponenten der Montageplatte mit dem Zylinder verbunden. Die Stempelkonstruktion wurde über eine Felxo-Kupplung mit der Kolbenstange verbunden. Die Stempelkonstruktion dient zur Verlängerung der Kolbenstange, mit der zusätzlichen Reichweite kann die Distanz zwischen Zylinder und Ofen zurückgelegt werden. Um einen möglichst realistischen Versuchsaufbau zu gewähren, wurden noch 3 Ofenplatten eingelegt, die die Ofenkonstruktion simulieren sollen.



Abbildung 23: Stellt den realen Aufbau der Pneumatikkomponenten auf der Montageplatte dar

Die Software ist essentiell für die Kontrolle und Steuerung der automatischen Steuerseite. Die Software mit dem Programm von LabVIEW wurde von der Firma National Instruments geschrieben. Wesentliches Kennzeichen für LabVIEW ist die graphische Programmierung. Über die graphische Oberfläche der Software kann man bestimmte Betriebszustände prüfen. Es können verschiedene Zylinderfahrten realisiert werden, wie druckloses Senken oder Senken mit bestimmtem Druck (beziehungsweise Kraft), außerdem kann das



Heben gesteuert werden. Mit Hilfe eines Proportional-Druckregelventils kann ein bestimmter Druck (beziehungsweise Kraft) aufgebracht werden. Durch die Eingabefunktionen an der Computereinheit werden über die Messbox elektrische Signale an die Magnetventile und das Proportional-Druckregelventil gesendet.

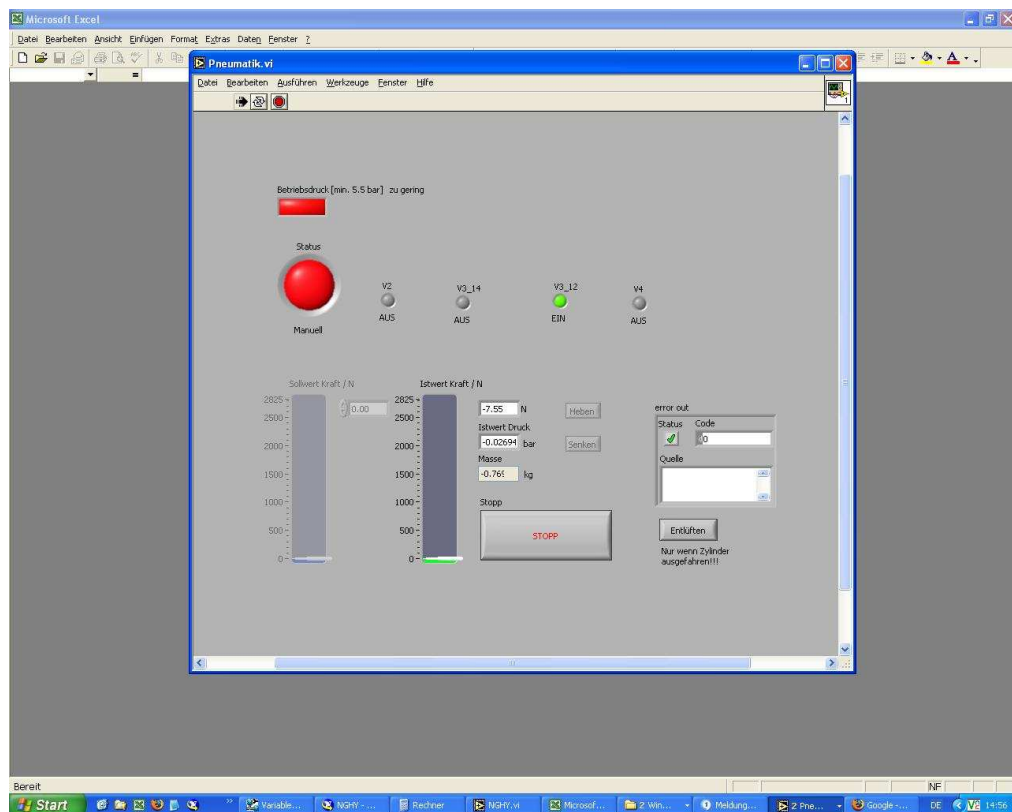


Abbildung 24: Zeigt die graphische Oberfläche der Steuersoftware

Da alle Vorbereitungen und Voraussetzungen geschaffen wurden, kann ein Funktionstest der automatischen Steuerseite durchgeführt werden. Der Vorteil des Tests der automatischen Steuerseite ist, dass er leicht zu einem kompletten Funktionstest erweitert werden kann. Da die Funktion der manuellen Steuerseite eine Voraussetzung darstellt, ist dies möglich. Dieser Test gibt eine rein formelle Information über die Funktion wieder. Es wurden verschiedene Zylinderfahrten mit verschiedenen Druckparametern durchgeführt. Die Funktionstests verliefen positiv, bis auf lange Ansprechzeiten des Zylinders in den niedrigen Druckbereichen. Des weiteren wurden nach diesem Test die Rückschlagventile direkt am Pneumatikzylinder installiert, um das Luftvolumen

im Zylinder und im Anschluss zu verringern. Damit wurde höhere Stabilität der Kolbenstange erreicht.



Abbildung 25: Das ist eine Darstellung des Versuchsstandes mit Pneumatikzylinder und Montageplatte mit Pneumatikkomponenten

### 6.3 Gesamtheitlicher Funktionstest

Der komplette Funktionstest umfasst zahlreiche Zylinderfahrtmöglichkeiten und Einstellparameter. Die Parameter werden möglichst realitätsnah gewählt. Grundeinstellungen umfassen verschiedene Parameter wie Druck des lokalen

Druckluftnetzwerks, Betriebsdruck, Druck der Schwerkraftkompensation (Präzisions-Druckregelventil), Ausgangsdruck des Druckboosters.

Einstellparameter	Druck in bar
Netzwerkdruck	6,2
Betriebsdruck	6,2
Schwerkraftdruck	~ 0,17
Ausgangsdruck	10
Druckbooster	

Tabelle 4: Zeigt die eingestellten Parameter an der Anlage

Das manuelle Senken wurde als erstes geprüft, damit muss der Steuerkreis auf manuell eingestellt werden, dies geschieht über einen Schlüsselschalter. Die Besonderheit bei dieser Funktionsart ist, dass das Senken drucklos erfolgen muss. Dieses wird durch das Betätigen eines Druckschalters (V10) realisiert. Das manuelle Senken funktioniert drucklos, allerdings ist negativ zu werten, die lange Ansprechzeit des Zylinders und die Stotterfahrt der Kolbenstange. Um das drucklose Senken der Kolbenstange zu erreichen, musste am Magnetventil V4 der Schalldämpfer entfernt werden, weil sonst die Belüftung des Zylinders verhindert würde. Um das manuelle Heben zu testen, muss der zugehörige Drucktaster (V9) betätigt werden. Das manuelle Heben funktioniert ohne eine Einschränkung.

Um das automatische Senken zu prüfen, muss der Schlüsselschalter auf Automatik eingestellt werden. Das automatische Heben wird über die Computereinheit gesteuert. Die Funktion des automatischen Hebens gelang ohne Einschränkungen. Das automatische Senken wird ebenfalls über die Computereinheit geregelt. Um die an der Computereinheit eingegebenen Sollwerte zu prüfen, wird eine Spezialwaage der A.S.T GmbH eingesetzt. Diese Waage gibt die von dem Pneumatikzylinder übertragenden Kräfte an, damit zeigt die Waage den Istwert. Die Ist- und Sollwerte des automatischen Senkens werden in der Tabelle 5 dargestellt.



Abbildung 26: Zeigt die Stempelkonstruktion, die Spezialwaage und die Ofenplatten im Versuchsstand

Sollwert in N	Istwert (Computereinheit) in N	Istwert (an der A.S.T Waage) in N	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in N	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in kg	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in Prozent
100	98...102	99,5	0,5	0,051	0,50
200	193...198	197,5	2,5	0,255	1,25
300	294...298	296,9	3,1	0,316	1,03
400	396...400	397,5	2,5	0,255	0,63
500	499...505	497,0	3,0	0,306	0,60
750	749...755	746,6	3,4	0,347	0,45
1000	999...1009	988,0	12,0	1,223	1,20
1250	1247...1253	1239,0	11,0	1,121	0,88
1500	1498...2508	1490,3	9,7	0,989	0,65
1750	1750...1757	1734,9	15,1	1,539	0,86
2000	1997...2009	1978,6	21,4	2,181	1,07
2250	2247...2260	2231,0	19,0	1,937	0,84
2400	2399...2407	2377,0	23,0	2,344	0,96
2500	2499...2512	2472,0	28,0	<b>2,854</b>	1,12
2600	2599...2608	2571,9	28,1	<b>2,864</b>	1,08
2700	2698...2711	2676,4	23,6	2,406	0,87

Tabelle 5: Zeigt die Ergebnisse für die jeweiligen an der Computereinheit eingegebenen Sollwerte

Die maximale Schwankung darf laut Ausschreibung 2,5 kg betragen, das heißt, dass im Bereich 2500 bis 2600 N unzulässige Schwankungen auftreten. Diese unzulässige Schwankung kann am Präzisions-Druckregelventil nachreguliert werden, das hat allerdings Einfluss auf alle Werte. Das bedeutet, nach einer Nachregelung müssen mindestens die oberen und unteren Grenzen auf unzulässige Schwankungen geprüft werden. Das Präzisions-Druckregelventil ist sehr schwierig einzustellen, da es sehr empfindlich ist. Ein Problem stellte die unterschiedlichen Ansprechzeiten bei der automatischen Hebefahrt dar. Denn je mehr Druck auf der Senkseite des Zylinders anliegt, desto größer ist die Ansprechzeit der Hebefahrt. Das heißt, die Entlüftung nimmt zu viel Zeit in Anspruch. Die hohe Stabilität des Versuchsstandgestells ist positiv zu bewerten.

Weitere Verbesserungen sind notwendig, um die Sicherheit und Genauigkeit des Systems zu gewährleisten. Eine wesentliche Verbesserung ist der Einbau von Näherungsschaltern am Zylinder, um eine unkontrollierte Sollwertvorgabe zu verhindern. Eine unkontrollierte Sollwertvorgabe kann zu hohen Sicherheitsrisiken führen. Die Nachregulierung des Präzisions-Druckregelventils wurde durchgeführt, um den zulässigen Schwankungsbereich zu erreichen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Sollwert in N	Istwert (Computereinheit) in N	Istwert (an der A.S.T Waage) in N	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in N	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in kg	Differenz (zwischen Soll- und Istwert) in Prozent
100	98...102	110,3	10,3	1,050	10,30
1000	999...1009	997,6	2,4	0,245	0,24
2000	1997...2009	1986,0	14,0	1,427	0,70
2500	2499...2512	2477,0	23,0	2,344	0,92

Tabelle 6: Zeigt ähnlich wie Tabelle 5 die Ergebnisse für die jeweiligen an der Computereinheit eingegebenen Sollwerte nach der Anpassung der Schwerkraftkompensation

## 7. Zusammenfassung

Die Zusammenfassung zeigt noch einmal die erreichten Ergebnisse im Vergleich zu den Voraussetzungen und Zielen. Das Ziel war, die Entwicklung einer flexiblen Verspanneinrichtung mit bestimmten Vorgaben. Die Einstellung der Drucksensoren könnte korrekt ausgeführt werden, somit ist das Arbeiten in den richtigen Druckbereichen gewährleistet. Schwieriger gestaltete sich die Einstellung der Schwerkraftkompensation, da sie sehr empfindlich ist. Doch letztendlich könnte die Schwerkraftkompensation genau justiert werden, es ist empfehlenswert bei Folgeanlagen einen kleineren Druckbereich für die Schwerkraftkompensation zu wählen. Wichtige Eckpunkte sind die Funktionen, manuell oder automatisch, sowie die Zylinderfahrten, das Heben und Senken (drucklos oder mit einer definierten Kraft). Zusätzlich sind bestimmte Druckbeziehungsweise Kraftparameter im Zustand des automatischen Senkens zu erreichen. Der konkret zu realisierende Kraftbereich liegt zwischen 50...2500 N, mit einem definierten Schwankbereich von 2,5 kg. Nach zahlreichen Hindernissen in der Installation, Softwareausarbeitung und des Funktionstests konnten die gesteckten Ziele erreicht und für den Schwankbereich erfüllt werden.

Weiterhin besitzt die pneumatische Verspanneinrichtung ein hohes Potential und gute Zukunftschancen. Ein sehr großes Potential ist zweifelsohne vorhanden, da einige Anlagenteile sowie bestimmte Randbedingungen weiterhin ausgebaut werden können. Ein gutes Beispiel für die Ausbaufähigkeit ist die Reduzierung hoher Ansprechzeiten des Zylinders und die Verminderung der Stotterfahrten. Eine Vergrößerung der Pneumatikschlauchquerschnitte sollte die Stabilität des Systems verbessern. Ebenfalls ist die Software noch erweiterungsfähig, um auf flexible Höhen der Brennstoffzelle zu reagieren, kann man mit Hilfe der Näherungsschalter entsprechende Lösungen programmieren. Ein konkretes Beispiel ist der Einsatz von Merkerbausteinen in der Software, um mit einem Näherungsschalter einen bestimmten Höhenbereich zu

definieren. So kann auch der Sicherheitsfaktor stark verbessert werden, dies wäre ein immenser Vorteil, da die Sicherheit der Mitarbeiter vorrangig ist.

Das Anwendungsfeld der pneumatischen Anlage ist also nicht ausgereizt, mit minimalen Veränderungen können wesentlich höhere Kraft- beziehungsweise Druckbereiche erreicht werden. Die Zukunftschancen dieser pneumatischen Verspanneinrichtung sind als sehr gut zu bewerten. Grund dafür ist, das angesprochene Ausbaupotential und die flexiblen Einsatzmöglichkeiten. Dies sind Voraussetzungen für einen optimistischen Zukunftsblick. Trotz Zeit weiser Rückschläge konnte, im Rahmen der Vorgaben, eine funktionierende pneumatische Verspannungsanlage entwickelt werden.

## 8. Glossar

AFC	Englisch: Alkaline Fuel Cell, Alkalische Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle
Aluminiumoxid	Aluminiumoxid ist ein Werkstoff aus einer Sauerstoffverbindung mit Aluminium
Anode	Anode ist eine Elektrode, bei der Oxidationsreaktion stattfindet
Asynchronmotor	Der Asynchronmotor besitzt einen passiven Läufer, der ständig oder teilweise kurzgeschlossen wird, durch das sich ändernde Magnetfeld wird ein resultierendes Magnetfeld induziert, welches dem Verursachenden entgegen wirkt
Boyle-Mariottesche Ges.	Gibt an, dass Druck idealer Gase bei gleich bleibender Temperatur und Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen ist
Brennstoffzelle	Brennstoffzelle kann durch eine chemische Reaktion kontinuierlich zugeführten Brennstoffs in elektrische Energie und Wärmeenergie umwandeln
Carnot-Gesetz	Beschreibt höchsten, theoretisch möglichen Wirkungsgrad bei idealem Kreisprozess einer Wärmekraftmaschine
Chemische Reaktion	Chemische Reaktion ist Vorgang, bei dem aus einem oder mehreren Reaktanten, ein oder mehrere Produkte entstehen
CORDIERIT	CORDIERIT ist ein Werkstoff aus feuerfester Keramik
DEGUSSIT	DEGUSSIT ist ein Werkstoff aus Oxidkeramik
DMFC	engl.: Direct Methanol Fuel Cell, Direktmethanol Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle



Doppelt wirkender Zyl.	Doppelt wirkende Zylinder besitzen zwei gegenüberliegende Kolbenflächen, dadurch ergeben sich zwei aktive Bewegungsrichtungen
Drehstrommotor	Ein Drehstrommotor wird mit Dreiphasenwechselstrom betrieben. Drei kreisförmig angeordnete Spulen erzeugen ein summiertes Magnetfeld, in dem sich der Läufer mit der Frequenz der Spannung dreht
Dreiphasenwechselstrom	Drei Spulen erzeugen drei zeitlich versetzte Wechselspannungen
Druckventil	Druckventil regelt beziehungsweise begrenzt den Druck (p) des Arbeitsmediums
Dynamomaschine	Elektrischer Generator ist eine elektrische Maschine, die mechanische in elektrische Energie umwandelt
Edelstahl (1.4301)	Dieser Edelstahl ist ein Werkstoff aus austenitischen Stahl mit den Legierungselementen Chrom und Nickel
Elektrode	Elektrode ist ein Elektronenleiter, der im Zusammenspiel mit der Gegenelektrode an einer chemischen Reaktion teil nimmt
Elektrolyt	Elektrolyt ist ein Stoff, der mit der angelegten Spannung elektrischen Strom leitet
Einfach wirkender Zyl.	Einfach wirkende Zylinder haben nur eine Kolbenseite, die mit Druckmedium beaufschlagt wird, die Rückbewegung erfolgt durch die Eigenmasse oder einer Fremdkraft (meistens eine Feder)
Emission	Emission ist der Austrag von giftigen beziehungsweise umweltschädlichen chemischen Stoffen
Endplatten	Endplatten sind Kopf- und Fußplatten, die unter- und oberhalb des Stacks fixiert werden, um eine Verspannung zu gewährleisten
Erdgas	Erdgas ist ein brennbares Naturgas, es besteht hauptsächlich aus Methan

Erregerwicklungen	Erregerwicklungen werden Spulen bezeichnet, die ein magnetisches Feld für die Energiewandlung erzeugen
Finite Element Methode	Die Finite Element Methode (FEM) ist numerisches Simulationsverfahren, bei der ein Objekt in Elemente aufgeteilt wird. Die Zahl der Elemente ist endlich (finit) und kann dadurch berechnet werden.
Getriebe	Getriebe ist eine bewegliche Verbindung von Teilen zur Übertragung von Bewegungen
Grove, William Robert	Grove, ein britischer Naturwissenschaftler, gilt als ein Erfinder der Brennstoffzelle
Hotbox	Ofen in dem kontrolliert Wärme erzeugt wird
Hydraulik	Hydraulik ist eine Getriebeart, die über ein flüssiges Medium mechanische Energie freisetzt
Interkonnektorplatten	Biopolarplatten sind Elektrodenplatten mit feinstverzweigten Kanälen, die von Wasserstoff-beziehungsweise Sauerstoffgas durchströmt werden
Kalilauge	KOH, Kaliumhydroxid ist eine stark alkalische, ätzende, wässrige Lösung
Katalysator	Katalysator ist ein Stoff, der die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion beeinflusst
Kathode	Kathode ist eine Elektrode, bei der eine Reduktionsreaktion abläuft
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub> , Kohlenstoffdioxid ist ein Gas, das beim Verbrennen von kohlenstoffhaltigen Stoffen erzeugt wird
Kompressibilität	Kompressibilität ist eine physikalische Größe, gibt die Druckänderung im Verhältnis zur Volumenänderung an
Kompressor	Verdichter ist eine Maschine, die man zum Komprimieren von Gasen nutzt

KVS	KVS ist ein Werkstoff aus einer Mischung von Aluminiumsilikat- und/oder Aluminiumoxidwolle, Füllstoffen und Bindemitteln.
Läufer/Rotor	Der Läufer oder auch Rotor ist ein Sekundärteil, das eine rotierende oder geradlinige, je nach Typ des Motors, Bewegung ausführt
MCFC	Englisch: Molten Carbonate Fuel Cell, Schmelzkarbonat Hochtemperatur-Brennstoffzelle
Membran	Membran ist eine Trennschicht zwischen verschiedenen Stoffen
Merkerbaustein	Der Merker ist ein Softwarebaustein zum speichern von Informationen oder Zuständen
Methanol	$\text{CH}_3\text{OH}$ , Methanol ist ein einwertiger Alkohol, der sich vom einfachsten Alkan Methan ableiten lässt
Näherungsschalter	Näherungsschalter verwenden Sensoren, die auf Annäherung von bestimmten Objekten berührungsfrei reagieren
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Amerikanische Bundesbehörde für Luft- und Raumfahrt
PAFC	Englisch: Phosphoric Acid Fuel Cell, Phosphorsäure Mitteltemperatur-Brennstoffzelle
PEMFC	Englisch: Polymer Electrolyte Fuel Cell, Feststoffpolymer Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle
Phosphorsäure	$\text{H}_3\text{PO}_4$ , Phosphorsäure ist eine Sauerstoffsäure mit mittlerer Stärke
Pneumatik	Pneumatik ist eine Getriebeart, die über ein gasförmiges Medium mechanische Energie freisetzt
Reaktant	Reaktant ist ein Ausgangsstoff für eine chemische Reaktion
Reformer	Ist ein Gerät, das verschiedene Brennstoffe in wasserstoffhaltige- und andere Komponenten teilt

Sauerstoff	O, Sauerstoff ist ein Gas, es ist das häufigste Element auf der Erde, sie besteht zu 20,942% aus Sauerstoff
Schönbein, Christian	Schönbein, ein Deutsch-Schweizerischer Chemiker, gilt als ein Erfinder der Brennstoffzelle
Selbsthemmung	Selbsthemmung beschreibt in der Mechanik den Widerstand gegen Verrutschen oder Verdrehen zweier aneinander liegender Körper
Siemens, Werner von	Siemens, war ein Deutscher Erfinder, gilt als Begründer der Elektrotechnik und Erfinder der Dynamomaschine
SOFC	Englisch: Solid Oxide Fuel Cell, Festoxid Hochtemperatur-Brennstoffzelle
SolidWorks	SolidWorks ist ein dreidimensionales CAD-Programm
Sperrventil	Sperrventil ist in der Lage, Rohrleitungen zu öffnen und zu schließen
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung ist eine Bauteil, das zur Regelung oder Steuerung einer Anlage oder Maschine eingesetzt wird
Stack	Zellstapel, bei dem einzelne Brennstoffzellen elektrisch in Reihe geschaltet werden
Stator	Der Stator oder auch Ständer bezeichnet bei elektrischen Maschinen ein feststehendes, unbewegliches Teil
Stromventil	Stromventil dient zur Regulierung des Mengenstroms des verwendeten Arbeitsmediums
Synchronmotor	Der Synchronmotor funktioniert über einen Läufer (permanentterregt oder Elektromagnet), der in einem magnetischen Drehfeld von dem Stator mitgenommen wird.
Thermodynamik	Thermodynamik oder auch Wärmelehre, ist ein Teilgebiet der klassischen Physik. Sie ist die Lehre

	der Energie, ihrer Erscheinungsformen und Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.
Vergleichsspannung	Nach der Mises-Vergleichsspannung versagen Bauteile bei Überschreiten eines bestimmten Grenzwertes. Damit können dreidimensionale Belastungszustände im Bauteil mit Materialkennwerten (Zugfestigkeit oder Streckgrenze) verglichen werden.
Wasserstoff	H, Wasserstoff ist das häufigste chemische Element, kommt auf der Erde in atomarer Form nicht vor
WDS Ultra	WDS Ultra ist ein Werkstoff aus hauptsächlich hochdispenser Kieselsäure
Wegeventil	Wegeventile dienen dazu, den Weg für das Arbeitsmedium freizugeben, zu sperren oder die Flussrichtung zu ändern
Wicklung	Wicklung ist ein Begriff für eine Spule, die aus einem leitenden Material gefertigt wurde, sie dienen zur Erzeugung oder Übertragung von Magnetfeldern

## **9. Anlagen**

### **9.1 Literaturverzeichnis**

#### **9.1.1 Bücher**

##### Bauer 1998

Bauer, Gerhard: Ölhydraulik. – 7.Auflage – Stuttgart: Teubner, 1998

##### Grollius 2008

Grollius, Horst-W.: Grundlagen der Hydraulik. – 4.Auflage – Leipzig, Carl Hanser, 2008

##### Karamanolis 2003

Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen. – 1.Auflage – Würzburg: Vogel, 2003

##### Watter 2008

Watter, Holger: Hydraulik und Pneumatik. – 2.Auflage – Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2008

##### Will 2004

Will, Dieter; Ströhl, Hubert; Gebhardt, Norbert: Hydraulik. - 2.Auflage – Berlin: Springer, 2004

##### Winkler 2002

Winkler, Wolfgang: Brennstoffzellenanlagen. – 1.Auflage – Berlin: Springer, 2002

#### **9.1.2 Firmenschriften, Forschungsberichte, Verwaltungsdokumente**

##### Manual Festo

Manual und Dokumentation der Pneumatikkomponenten, Festo AG & Co. KG

### **9.1.3 Abbildungsquellen**

Abbildung 1: EBZ GmbH

Abbildung 2: Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen

Abbildung 3: Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen

Abbildung 4: Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen

Abbildung 5: Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen

Abbildung 6: Universität Karlsruhe, SOFC-Planar-Stack

Abbildung 7: Karamanolis, Stratis: Brennstoffzellen

Abbildung 8: EBZ GmbH

Abbildung 9: Paul-Scherrer-Institut (CH) / ETH Zürich (CH)

Abbildung 10: EBZ GmbH

Abbildung 15: EBZ GmbH

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, 30.10.2009

.....

Christian Winkler